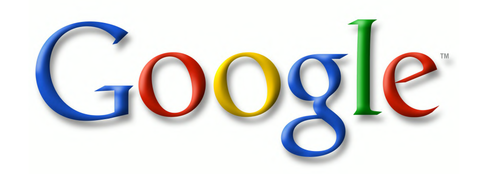
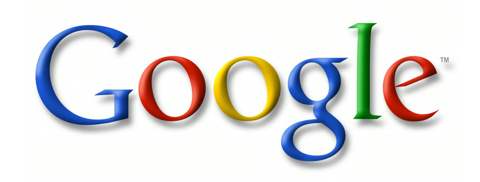
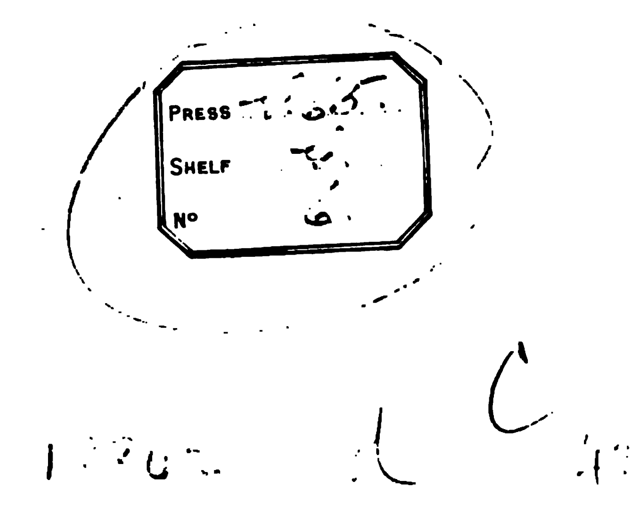
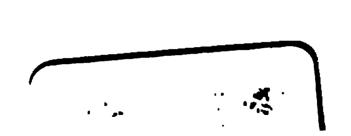









PRESS
SHELF
No





NOUVEAU COURS

DE

MINÉRALOGIE.



TOME I.

NOUVEAU COURS

DE

MINÉRALOGIE

COMPRENANT LA

DESCRIPTION DE TOUTES LES ESPÈCES MINÉRALES

AVEC LEURS APPLICATIONS DIRECTES AUX ARTS,

Par M. **DELAFOSSE**,

De l'Académie des Sciences de l'Institut impérial, Professeur de minéralogie au Muséum d'Histoire naturelle et à la Faculté des Sciences de Paris; Membre de la Société Philomathique, et de la Société Géologique de France; de la Société minéralogique d'Iéna; Correspondant de la Société Linnéenne du Calvados; de l'Académie de Reims et de la Société des Sciences, arts et belles-lettres de Saint-Quentin.

TOME PREMIER.

PARIS
A LA LIBRAIRIE ENCYCLOPÉDIQUE DE RORET,
RUE HAUTEFEUILLE, 12.
1858.

NOUVEAU COURS
DE
MINÉRALOGIE.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

§ 1. *Division de l'Histoire naturelle.*

L'*Histoire naturelle* proprement dite est la science qui a pour objet la distinction et la connaissance approfondie de tous les êtres, que l'on observe tant à la surface que dans l'intérieur du globe terrestre; elle parvient à les décrire exactement et à les classer selon leurs rapports naturels, en tenant compte de tous leurs caractères, c'est-à-dire de toutes les propriétés communes ou particulières qui constituent leurs analogies ou leurs différences.

Le partage de tous les êtres qui composent la nature en trois grandes divisions appelées *règnes*, remonte aux temps les plus reculés. Le *règne minéral* comprend tous les êtres qui sont dépourvus de vie; le *règne végétal*, tous les êtres vivants qui sont dépourvus de sensibilité et de mouvement volontaire; et le *règne animal*, tous les êtres vivants qui sentent et se meuvent à leur gré. L'histoire naturelle se subdivise en autant de branches correspondantes, qui sont : la *Minéralogie*, la *Botanique* et la *Zoologie*.

La plupart des naturalistes modernes ne font que deux grandes classes de tous les êtres naturels, savoir : le *règne organique* et le *règne inorganique*. Les animaux et végétaux ont cela de commun, qu'ils résultent de l'assemblage d'un certain nombre

de parties appelées *organes*, qui sont les instruments de la vie : on peut donc les désigner en commun par le nom d'*êtres vivants*, ou de *corps organiques*. Les minéraux étant privés de vie, sont par cela même dépourvus d'organes : ce sont des *êtres bruts*, ou des *corps inorganiques*.

§ 2. *Caractères qui distinguent les êtres vivants des corps bruts.*

Les principaux caractères qui distinguent les êtres vivants, sont d'avoir une *forme déterminée*, qui est généralement la même pour tous les individus de chaque espèce, du moins, lorsque ces individus ont atteint leur développement complet ; de présenter à l'intérieur une *structure* essentiellement hétérogène, puisqu'elle résulte de la combinaison de divers organes ou éléments organiques, le plus souvent distincts à l'œil nu, et mécaniquement séparables ; de *s'accroître par intussusception*, c'est-à-dire par le développement de toutes leurs parties à la fois, en recevant dans leurs masses de nouvelles molécules, qui vont s'interposer entre les anciennes en les écartant ; enfin de passer successivement par toutes les phases principales du grand phénomène de la vie, qui sont : la *naissance*, la *croissance*, la *reproduction* et la *mort*.

Rien de semblable n'existe chez les êtres bruts ; ils n'ont point de forme essentiellement déterminée : leur forme peut varier à l'infini, par suite de la manière dont se fait l'accroissement de leur masse, et de l'indépendance des parties qui la constituent. Toutes les fois que, dans la même masse, il n'y a point un mélange accidentel d'espèces différentes, ils ont une structure homogène ou mécaniquement simple, en sorte que les plus petites parties, prises séparément, représentent exactement l'ensemble dont elles possèdent toutes les propriétés. Ils diffèrent encore sous le rapport de leur origine et de leurs modes d'existence, d'accroissement et de destruction. Tandis que le corps organisé naît toujours d'un autre corps, semblable à lui, et qui l'a précédé ; le corps inorganiqne n'est point engendré par des êtres analogues et préexistants, il est formé de toutes pièces et par des éléments hétérogènes ; et pour que cette formation ait lieu, il suffit qu'une circonstance fortuite mette en présence les atomes qui composent ses molécules, et que leur attraction seule détermine à se réunir. Tandis que le corps organisé ne peut se maintenir et

s'accroître que par nutrition, c'est-à-dire par le transport et le dépôt de nouvelles molécules dans toutes les parties de la masse; de sorte que sa composition varie et se renouvelle sans cesse; le corps inorganisé s'accroît à l'extérieur seulement, par simple juxta-position de molécules nouvelles contre la masse déjà formée, qui n'éprouve plus de changement en elle-même. Enfin, tandis que les corps organisés ont une croissance et une durée limitées, il n'y a point de limite nécessaire à l'accroissement et à la durée des corps inorganiques: ne renfermant en eux aucune cause réelle de destruction, ils peuvent continuer d'exister, tant que persistent les circonstances qui ont permis leur formation, et tant qu'aucune force étrangère à leur nature ne vient désunir ou décomposer leurs molécules.

Ajoutons encore, comme caractères distinctifs entre les deux classes d'êtres, que les corps organisés sont composés chimiquement d'un très-petit nombre d'éléments, dont les plus généraux sont : l'oxygène, l'hydrogène, le carbone et l'azote, et que les combinaisons de ces éléments ont peu de stabilité; tandis que la composition chimique des corps bruts est très-variée; qu'ils sont, pour la plupart, des combinaisons des soixante éléments dont les chimistes modernes admettent l'existence, et que ces combinaisons sont généralement remarquables par leur fixité ou leur résistance à la décomposition.

§ 3. *Distinctions à établir entre les corps inorganiques.*

On peut établir des distinctions entre les corps inorganiques eux-mêmes, si l'on vient à les considérer sous le rapport des circonstances de leur formation. En effet, il en est qui ne se produisent que dans l'intérieur des corps vivants, et sous l'influence immédiate de la vie, comme les sucres, les gommes, les résines, etc. D'autres, au contraire, se forment toujours au sein de la nature inerte, sans aucune participation des forces vitales, comme les sels, les pierres, les métaux, et, dans cette vaste catégorie, on peut encore distinguer ceux qui se produisent avec ou sans le concours de l'industrie humaine. Enfin, il en est dont l'origine est mixte en quelque sorte, en ce qu'ils proviennent de matières organiques qui ont été longtemps enfouies dans le sol, et y ont changé de nature par suite des décompositions qu'elles y ont subies: tels sont, parmi les combustibles charbonneux, le lignite et la houille.

L'étude de tous les corps inorganiques compris dans la première division, et de ceux de la seconde qui sont formés artificiellement dans les usines et les laboratoires de chimie, est ordinairement renvoyée à cette dernière science; les seuls corps bruts, que l'on considère comme étant du domaine de l'histoire naturelle proprement dite, sont ceux que la nature produit d'elle-même sans l'intervention de l'homme ni d'aucun autre être vivant (1), ceux que nous extrayons ordinairement du sein de la terre par le moyen des fouilles que nous y pratiquons, et qu'à cause de cela l'on désigne sous le nom de *minéraux* (2).

§ 4. *Objet de la Minéralogie*.

La *Minéralogie* est la science qui a pour objet l'étude des minéraux, c'est-à-dire des corps inorganiques qui ont été formés naturellement, et qui existent dans la composition de la masse de la terre et de ses dépendances immédiates. Elle se partage en plusieurs branches, d'après les différents points de vue sous lesquels les minéraux peuvent être considérés : 1° la *minéralogie physique*, ou l'étude des caractères, et l'on pourrait presque dire la physiologie des minéraux; car cette partie de la science correspond parfaitement à ce que l'on nomme dans les règnes organiques, l'anatomie et la physiologie comparées (3). Elle étudie

(1) L'habitude où l'on est, de limiter ainsi le champ de la science qui nous occupe, vient de ce qu'on a voulu conserver à la minéralogie le caractère d'une science purement descriptive, se rapportant exclusivement, comme la botanique, à ce qui existe dans la nature. Mais les composés formés avec notre participation dans les laboratoires et les usines, qu'on appelle assez improprement des produits artificiels, n'en sont pas moins des œuvres de la nature; car, dans l'acte de leur formation, c'est bien elle qui agit encore et toujours d'après les mêmes lois, notre rôle se bornant à lui servir de simple préparateur ou d'aide intelligent. Ainsi donc, la séparation que l'on établit entre les productions immédiates de la nature et les produits analogues de nos laboratoires, est fort peu rationnelle, et elle a des inconvénients graves, dont s'aperçoivent aisément les minéralogistes classificateurs. Maintenant surtout que la minéralogie tend à se rapprocher de plus en plus de la chimie minérale, on sent mieux l'avantage qu'il y aurait à ne pas rompre ainsi les affinités naturelles de corps de formation semblable, et qui demandent à être étudiés comparativement et classés d'après les mêmes principes. En les comprenant tous dans le même tableau, on comblerait bien des lacunes que présentent nos méthodes actuelles, et par là on rendrait celles-ci moins imparfaites.

(2) On leur donnait anciennement, et on leur donne encore dans quelques langues étrangères, le nom de *fossiles*, dont le sens étymologique est exactement le même.

(3) Plusieurs minéralogistes allemands, M. Naumann entre autres, la dési-

en effet les différents caractères des minéraux, les variations qu'ils peuvent subir d'une espèce à une autre, et les corrélations qui existent entre eux dans le même corps. 2° La *minéralogie systématique*, ou les principes de la classification des minéraux dans un ordre méthodique, propre à faire ressortir leurs analogies et leurs différences. 3° La *minéralogie descriptive* ou *historique*, comprenant l'histoire de chacune des espèces de minéraux connus, et la description détaillée des diverses variétés dont elle se compose. 4° La *minéralogie géognostique*, qui s'occupe des rapports que les minéraux ont entre eux dans le sein de la terre, de leurs associations naturelles, de la forme et de la position des masses qu'ils constituent, des circonstances et des époques relatives de leur formation. 5° La *minéralogie technologique*, ou cette partie de la science qui est relative aux applications qu'on peut faire des minéraux à nos usages, nos besoins et même nos plaisirs, par conséquent à ce qu'on appelle généralement les arts utiles et les arts d'agrément.

§ 5. *Définition des minéraux. — De l'Espèce et de l'Individu en minéralogie.*

De tout ce que nous avons dit précédemment, et surtout des notions générales que nous pouvons emprunter aux sciences physiques, il résulte que le *minéral*, lorsqu'il est réduit à l'état de pureté, doit être considéré comme une masse formée par l'aggrégation de *molécules physiques*, identiques entre elles sous tous les rapports, et par conséquent par leur forme, leur structure et leur nature chimique. Par molécule physique, nous entendons ici le dernier degré de division opérée dans un corps par la chaleur seule. Cette première vue, si claire et si simple en elle-même, va nous permettre de nous faire, par anticipation, une idée très-juste du caractère propre de la minéralogie, de ce qui la distingue des autres parties de l'histoire naturelle, et de ce qu'on doit entendre dans cette science par les mots d'*individus*, d'*espèces* et de *variétés*.

Les molécules d'un minéral, éléments invisibles de sa masse, sont adhérentes entre elles, sans pour cela être en contact im-

gnent en effet sous ce nom de Physiologie. On pourrait aussi l'appeler la *Cristallographie comparée*, car on verra que la recherche des lois qui régissent les différents caractères porte principalement sur les minéraux considérés à l'état cristallin.

médiat ; elles sont maintenues dans une dépendance mutuelle, et retenues à distance les unes des autres par les forces d'attraction qu'elles exercent les unes sur les autres, et les forces répulsives que développe en elles le principe de la chaleur. Les molécules physiques du minéral sont donc dans une sorte d'équilibre plus ou moins stable, qui dépend entièrement des circonstances dans lesquelles le corps est placé, puisqu'en changeant sa température, on voit souvent sa masse passer par des états divers de consistance, tels que l'état solide, l'état liquide, et l'état gazeux ou aériforme.

Un minéral n'étant qu'un aggrégat de molécules semblables, simplement apposées les unes aux autres, on peut partager sa masse en portions de plus en plus petites, lesquelles sont toujours de même nature que la masse primitive; mais quelque loin que l'on pousse cette division, on ne peut jamais obtenir que des masses de moindre volume, et non des molécules isolées, auxquelles nous ne saurions atteindre à cause de leur excessive petitesse. Diviser mécaniquement un corps, ce n'est pas faire plusieurs parties distinctes d'un tout, qui aurait été d'abord réellement simple et continu; ce n'est qu'augmenter la séparation d'une certaine quantité de ses molécules qui se trouvaient déjà hors de contact, jusqu'au point de rompre complètement leur adhérence, laquelle ne peut exister ni se maintenir qu'autant qu'elles sont à de très-petites distances les unes des autres.

De ce que le minéral est un pur assemblage de molécules, dont le mode d'aggrégation peut varier à l'infini, il suit que des corps de même nature (ou qui sont composés de molécules semblables) pourront offrir de grandes différences dans leurs caractères extérieurs, suivant que leurs molécules seront plus ou moins rapprochées et disposées d'une manière régulière ou confuse. Cette variation dans les caractères extérieurs d'une même substance est telle, qu'il y a quelquefois plus de diversité d'aspect entre deux minéraux de même espèce (ou formés des mêmes molécules) qu'entre deux minéraux d'espèce différente et dont les molécules n'ont rien de commun entre elles. De là, la nécessité de distinguer soigneusement, parmi les caractères d'un minéral, ceux qui n'expriment qu'une simple différence dans l'arrangement des particules, d'avec ceux qui en représentent une dans la nature même de ces molécules : ces derniers sont évidemment d'une plus grande importance que les autres. Or, ce qui distingue plus particulièrement la minéralogie des autres

branches de l'histoire naturelle, c'est que, dans les corps organisés, les caractères de première valeur se tirent de propriétés extérieures, toujours apparentes et par conséquent faciles à saisir, tandis que dans les minéraux les propriétés les plus essentielles pour la distinction des espèces sont en même temps les plus cachées et les plus difficiles à dévoiler.

Ce que l'on étudie de préférence dans un animal ou dans une plante, c'est l'organisation de l'être, c'est-à-dire la forme, la structure et la position de ses organes, qui presque toujours tombent sous les sens, et non pas la nature chimique de ses molécules. Dans les minéraux, au contraire, ce sont les caractères qui expriment la différence de nature des molécules, que l'on doit mettre en première ligne : ceux qui tiennent à l'aspect *extérieur*, à la forme et à la structure de la masse, n'ont qu'une importance secondaire, et ce sont cependant les seuls dont l'observation puisse être immédiate. C'est là ce qui rend si difficiles en minéralogie la distinction et la classification des espèces, bien qu'elles soient peu nombreuses, tandis que dans les règnes organiques, où le nombre des espèces est incomparablement plus considérable, on parvient bien plus aisément à les reconnaître et à les ranger dans un ordre méthodique.

Nous avons dit qu'un minéral consistait dans une agglomération de molécules semblables : cette proportion est vraie en général, mais elle ne l'est pas d'une manière absolue ; car il est des masses qui sont complexes sous les rapports physique et mécanique, c'est-à-dire qui sont un mélange de parties, visibles ou invisibles, de nature différente. Nous reviendrons bientôt sur ce cas particulier ; mais pour l'instant nous en ferons abstraction, et raisonnerons comme si toutes les masses minérales existantes sur le globe terrestre, étaient parfaitement pures et simples quant à leurs éléments moléculaires. En nous plaçant à ce point de vue, il nous sera facile de découvrir le véritable fondement de l'*espèce* et de la *variété* en minéralogie.

Prenons en effet deux masses minérales quelconques, A et B, que nous supposerons homogènes et pures, et comparons-les sous le rapport de leur composition moléculaire ; il arrivera de deux choses l'une : ou les deux masses seront formées d'une même sorte de molécules *a, a, a*... ou bien elles seront formées de molécules de nature différente, la masse A de molécules *a, a, a*..., la masse B de molécules *b, b, b*... Dans le premier cas, il pourra y avoir dans les deux masses des différences extérieures,

tenant uniquement au mode d'aggrégation des molécules; mais quelle que soit la diversité d'aspect des deux masses, il est impossible que nous ne jugions pas cette différence comme bien moins importante que celle qui résulterait, le second cas échéant, de la non-identité des molécules, c'est-à-dire des véritables éléments physiques de la masse, dans les deux corps A et B. Par cette remarque, nous sommes naturellement amenés à dire que deux minéraux sont de même nature, de même composition chimique et moléculaire, en un mot, *de même espèce*, lorsqu'ils sont composés de molécules similaires, quelle que puisse être d'ailleurs la différence des aspects sous lesquels ils s'offrent à nos yeux; et que deux minéraux sont d'*espèces différentes*, lorsque les molécules qui forment l'un diffèrent de celles qui composent l'autre. Le caractère essentiel de l'espèce minérale réside donc dans la molécule physique, qui est, comme nous l'avons déjà dit, le véritable élément du corps. Il est fâcheux, sans doute, que des éléments d'une aussi grande importance, et sur lesquels nous serons obligés d'arrêter sans cesse notre pensée, échappent complètement à nos sens par leur infinie petitesse, et que nous ne puissions les apercevoir que par les yeux de l'esprit; mais on verra bientôt que la science nous fournira les moyens, non-seulement de nous convaincre de leur existence réelle, mais encore de reconnaître à des caractères certains, s'il y a, entre deux corps que l'on compare, identité ou diversité de molécules. Or, c'est tout ce qu'il importe de savoir pour la distinction et la délimitation rigoureuse des espèces.

Il existera donc autant d'espèces minérales différentes qu'il y aura de corps composés de molécules diverses. Nous examinerons et dirons bientôt en quoi consiste cette diversité de molécules; mais auparavant établissons ce que l'on doit entendre par *variétés* dans une espèce.

L'espèce minérale, d'après ce qui précède, peut être définie : la collection de tous les minéraux, qui sont composés de molécules de même nature, quel que soit leur mode d'aggrégation, c'est-à-dire, la réunion de tous les corps, dans chacun desquels toutes les molécules sont identiques entre elles et avec celles des autres corps. Cette définition laissant dans une indétermination complète le mode de réunion des molécules dans la masse, on conçoit dès-lors qu'il puisse y avoir, sans changement d'espèce, un écartement ou un rapprochement plus ou moins considérable des molécules, des modes d'aggrégation plus ou

moins réguliers, plus ou moins confus, d'où résulteront des variations notables dans les caractères extérieurs, des modifications accidentelles de forme, de structure et d'aspect : telle est l'origine des *variétés* en minéralogie. Tous les minéraux de la même espèce, qui diffèrent assez dans l'arrangement de leurs molécules, pour qu'il s'ensuive une différence sensible dans les caractères extérieurs, constituent autant de variétés particulières dans cette espèce; tous ceux qui appartiennent à une même variété, et qui ne sont que la copie, la répétition les uns des autres, sont considérés comme des individus semblables de cette variété, et par conséquent aussi de la même espèce.

Ainsi, le *calcaire* est une espèce, dont les molécules sont des groupes d'atomes, de forme et de composition chimique bien déterminées, et qui comprend un grand nombre de variétés de formes, de structures et d'aspects : le *calcaire rhomboédrique;* le *calcaire prismatique;* le *calcaire transparent et incolore* (dit spath d'Islande); le *calcaire saccharoïde* (ou marbre statuaire); le *calcaire compacte fin* (marbres communs, pierres lithographiques); les *calcaires grossiers* (pierres à chaux, pierres à bâtir); la *craie*, qui est un calcaire blanc et friable, etc. Tous ces minéraux, d'aspects si différents, sont des variétés d'une même espèce minérale, parce qu'ils sont formés par une aggrégation de molécules semblables; de même, le *quarz* est une seconde espèce minérale, qui comprend, au nombre de ses variétés, une foule de corps bien connus et d'aspects très-divers : le *cristal de roche*, qui est limpide et incolore comme le verre; l'*améthyste*, qui est une pierre vitreuse, de couleur violette; les *agates*, pierres translucides et polissables, qu'on emploie dans la bijouterie; les *silex*, ou pierres à fusil; les *sables* et *grès* communs; les *jaspes*, etc.

Ces deux exemples suffisent déjà pour montrer jusqu'où peut aller la variation dans les caractères extérieurs d'une même substance minérale; elle est telle, avons-nous dit, qu'il y a quelquefois plus de diversité, sous le rapport du *facies*, entre deux minéraux de même espèce, qu'entre deux autres minéraux d'espèces différentes, dont les molécules peuvent n'avoir rien de commun entre elles. Nous citerons comme exemples de corps, qui offrent une ressemblance apparente, quoique étant de nature et d'espèce différentes, le calcaire et le gypse blanc fibreux; les marbres et les jaspes de mêmes nuances; le sulfate de baryte et le carbonate de plomb bacillaires; le calcaire et la kar-

sténite saccharoïdes, etc. Ces corps ont une telle ressemblance extérieure, que l'œil ne peut s'empêcher de les confondre, et qu'il faut nécessairement recourir à quelque épreuve physique ou chimique, si l'on veut éviter une méprise.

§ 6. *Preuves de l'existence des Espèces dans le règne minéral.*

Revenons un moment encore sur la définition de l'espèce minérale. Des naturalistes philosophes, qui se sont plu à comparer les principes et la marche des différentes parties de l'histoire naturelle, ont prétendu qu'il n'existait en minéralogie ni espèces, ni individus; et cela, parce que s'étant trop préoccupés de l'idée qu'on se forme ordinairement des espèces organiques, ils n'ont pas séparé dans leur esprit le fait de l'existence de ces espèces considérées en elles-mêmes, et indépendamment des causes qui les produisent, de celui de leur propagation par voie de génération successive. Bien que dans la nature ces deux faits paraissent toujours concomitants, il n'y a point entre eux un rapport tellement nécessaire, que le premier ne puisse être conçu sans l'autre. Dans les règnes organiques, les individus d'une même espèce naissent les uns des autres; c'est un fait qui paraît constant; mais ce mode de propagation des individus ne constitue point la véritable essence des espèces, elle consiste uniquement dans un type d'organisation défini, bien arrêté, susceptible d'une détermination rigoureuse, et se répétant exactement le même dans un grand nombre d'individus. Un type déterminé, que plusieurs corps répètent exactement, qui est reproduit sans altération dans ses caractères essentiels, soit seulement dans l'espace, soit dans le temps et dans l'espace tout à la fois, voilà ce qui constitue réellement une espèce : peu importe la manière dont s'est opérée ou peut s'opérer encore cette multiplication des individus. Que l'on fasse pour un moment abstraction du phénomène de la génération, en supposant permanente la création actuelle, les espèces n'en seront pas moins bien limitées que dans l'état réel des choses; elles se distingueront toujours facilement les unes des autres par les caractères qui leur sont inhérents, par les différences qui ressortent de leur organisation; et ne voyons-nous pas fréquemment les zoologistes reconnaître de nouvelles espèces parmi les corps organisés fossiles, pour lesquels

le phénomène de la vie, et par conséquent aussi le fait de la génération, n'existe plus (1).

En minéralogie, il y a des espèces, par la seule raison que les molécules intégrantes des minéraux ont des types de composition aussi bien déterminés que les types des différentes espèces organiques. Ainsi, la molécule du spath d'Islande est un assemblage défini d'atomes élémentaires, groupés dans un certain ordre et sous une certaine forme, la forme rhomboédrique, je suppose; d'où l'on voit que le type moléculaire dépend de plusieurs conditions que nous pouvons assigner : la nature, le nombre et l'arrangement des atomes composants. Dans le règne minéral, il n'y a point de génération, et par conséquent on ne peut là rattacher l'idée de l'espèce à un phénomène de ce genre, comme on le fait en botanique ou en zoologie. Mais, dans aucun cas, cette liaison n'est d'une nécessité absolue. Nous l'avons dit, et nous croyons devoir le répéter : partout, en histoire naturelle, ce sont l'existence et la fixité de types rigoureusement déterminables, qui constituent l'essence des espèces, et c'est la répétition exacte du même type dans plusieurs corps, ayant chacun une existence à part, qui fait les individus.

Au surplus, s'il n'y a point de génération proprement dite en minéralogie, il y a un autre fait qui en tient lieu ou qui en est comme l'équivalent : c'est celui de la reproduction constante, dans tous les lieux et dans tous les temps, de corps absolument semblables, par les mêmes éléments agissant les uns sur les autres *dans des circonstances pareilles*. Que les chimistes de Paris, de Berlin ou de Stockholm, mettent en présence des atomes de mêmes sortes, en réglant de la même manière leurs proportions relatives, ainsi que toutes les conditions de l'expérience, et nous sommes parfaitement sûrs qu'ils obtiendront tous exactement les mêmes produits. Ainsi, dans chaque formation de corps inorganique, il y a comme une sorte d'organisation fixe, ou au moins de composition et de structure moléculaire, qui est de nature à se reproduire invariablement; et c'est cette identité de reproduction qui établit la réalité et la perpétuité des espèces dans le règne minéral (2).

(1) Il est si vrai que ce n'est pas la génération successive des individus qui constitue l'espèce organique, que celle-ci cesserait d'exister évidemment, si des modifications continues et progressives avaient lieu dans les individus qui naissent les uns des autres.

(2) Il importe de remarquer ici que la fixité des molécules, et par consé-

§ 7. *Preuves de l'existence de véritables individus.*

Il est facile de démontrer qu'il existe aussi en minéralogie de véritables individus. On a nié leur existence, parce que prenant le mot *individu* dans son sens propre, et s'en tenant aux apparences, on ne pouvait reconnaître le caractère de l'individualité dans les masses minérales, qui sont susceptibles d'être divisées sans éprouver de changement dans leur nature. Mais ce caractère rigoureux existe dans chacun des éléments de la masse en particulier, c'est-à-dire dans la molécule, qui a le privilége de ne pouvoir plus être divisée, sans subir une véritable décomposition ou sans être détruite. Ainsi, en minéralogie, il y a des individus proprement dits, ce sont les molécules; mais ce qui est le propre du règne inorganique, ces individus ne se présentent jamais isolés; et il nous est impossible d'en obtenir un séparément par la division mécanique, parce que nous sommes forcés d'interrompre cette opération bien avant le terme où elle aurait atteint sa limite naturelle. L'individu minéralogique se dérobe à nos sens, mais il a une existence tout aussi réelle que l'individu organique. L'essence de chacun consiste dans une sorte de type, de structure, ou d'organisation déterminée; la seule différence qu'il y ait entre ces deux espèces d'individus, c'est que, dans l'individu minéral, l'organisation se trouve dans un état statique ou de repos absolu, tandis que, chez l'individu organique, l'organisation est dans une sorte d'équilibre mobile, dans un état continuel de mouvement ou de vie, qui est une des conditions de sa permanence.

Les molécules, comme on vient de le voir, sont les individus proprement dits du règne minéral ; mais ce sont les individus de la science théorique. Dans la pratique, on est dans l'usage de transporter ce nom aux masses minérales elles-mêmes, qui ne sont que des multiples de l'individu véritable, à l'exemple de ce

quent aussi celle des espèces, ne doivent point s'étendre d'une manière absolue : il faut que les circonstances dans lesquelles leur formation a eu lieu restent sensiblement les mêmes, pour qu'elles n'éprouvent point de variation. Un changement notable dans la température, la pression, ou les autres conditions physiques qui influent sur l'état des corps, peuvent amener la destruction subite ou la modification graduelle des molécules, et par conséquent produire le passage, soit brusque, soit insensible, d'une espèce à une autre. Dans le règne minéral surtout, la fixité des espèces est purement relative : elle est subordonnée à l'invariabilité des milieux qui les entourent.

qui se fait en botanique, et même dans quelques parties de la zoologie. Les masses minérales, en tant qu'elles sont formées par le groupement d'individus moléculaires semblables, sont des espèces d'individualités composées, que l'on peut comparer à ces aggrégations d'animaux, si communes dans les classes inférieures, ou bien encore à ces plantes, aux tiges ramifiées, qui offrent différents degrés de végétation, et, par conséquent, autant de générations successives sur la même souche. Or, le botaniste n'hésite pas à dénommer et à décrire chaque pied d'une plante phanérogame, comme un des individus de l'espèce, attendu qu'il en est la représentation la plus complète. Ainsi fait le minéralogiste, de chacune des masses soumises à son observation, et dans laquelle il voit un individu, lorsqu'elle est pure, c'est-à-dire, lorsqu'elle n'est qu'une même molécule répétée un grand nombre de fois.

§ 8. *Diverses classes de variétés.*

Nous venons de prouver qu'il existe en minéralogie de véritables individus et de véritables espèces; nous avons vu que la définition de l'espèce minérale comporte l'existence d'individus d'aspects divers ou de *variétés*. Examinons maintenant s'il n'y aurait pas une distinction importante à faire parmi les variétés d'une même espèce.

Si le nombre des espèces réellement distinctes, qui composent le règne minéral, est fort petit, en comparaison de celui des espèces végétales ou animales, en revanche les variétés de chaque espèce sont beaucoup plus nombreuses en minéralogie, et leur distinction a plus d'importance que celle des variétés dans les règnes organiques, parce que celles-ci ne sont en général que des modifications fort légères d'un type primitif, toujours reconnaissable, tandis que les premières expriment des différences plus considérables, qui vont quelquefois, comme nous l'avons déjà dit, jusqu'à changer totalement les qualités extérieures du corps. Aussi l'espèce minérale peut-elle se subdiviser en variétés de différents ordres, selon le degré de leur importance relative.

Or, puisque les variétés tiennent en général aux différents modes d'aggrégation des molécules, on doit distinguer d'abord deux cas principaux : celui où l'arrangement des molécules est régulier, et celui où il est irrégulier. De là deux classes de va-

riétés : les variétés à structure régulière, ou *variétés cristallines*, et les variétés à structure irrégulière, ou *variétés amorphes*. La cristallisation, cette propriété si remarquable des corps inorganiques, que nous étudierons bientôt avec toute l'attention qu'elle mérite, est généralement reconnaissable à un double caractère : une structure régulière à l'intérieur de la masse, et une forme extérieure pareillement régulière; mais de ces deux caractères le premier est le fondamental; car le second peut manquer, et, quand il existe, c'est toujours conjointement avec le premier, auquel il est subordonné. Un arrangement régulier des molécules d'un corps est donc ce qui constitue essentiellement l'*état cristallin*. Or, cet état est, à proprement parler, l'état de perfection des substances inorganiques, celui où elles jouissent de toutes leurs propriétés, et où ces propriétés se montrent le mieux en rapport les unes avec les autres. Il est en même temps le meilleur indice de l'existence d'un type moléculaire invariable, d'une composition chimique définie, et par conséquent de la réalité des espèces. Aussi la spécification porte-t-elle principalement sur les variétés cristallines, ce qui assigne à cette classe de variétés le premier rang et le plus haut degré d'importance. Ce sont, en effet, les seules qui soient immédiatement et complètement déterminables par elles-mêmes, c'est-à-dire, dans lesquelles on puisse reconnaître tous les caractères de l'espèce avec certitude et sans l'intervention d'une ou de plusieurs autres variétés. Celles de la seconde classe ne peuvent être rattachées à une espèce connue qu'avec plus ou moins de probabilité, à l'aide de quelque épreuve chimique fort simple, ou bien elles ne peuvent être déterminées que d'une manière *médiate*, au moyen des passages insensibles qui s'observent dans la nature, et s'établissent par une série d'intermédiaires, entre la variété que l'on veut connaître et une autre variété déjà connue ou susceptible d'une détermination immédiate.

§ 9. *Distinction de plusieurs sortes de masses minérales.*

On peut encore distinguer les variétés d'une espèce minérale, eu égard à leur composition moléculaire, en variétés pures ou simples, et en variétés impures ou mélangées. Il existe dans la nature beaucoup de masses minérales, qui sont simples quant à leurs éléments moléculaires, c'est-à-dire, qui sont dans toute leur étendue formées de molécules de même sorte : c'est à ces

masses seulement que la définition de l'espèce minérale s'applique immédiatement et sans difficulté. Mais on rencontre aussi fréquemment dans la nature d'autres masses, qui sont homogènes ou simples en apparence, quoiqu'elles résultent du mélange intime de molécules diverses, appartenant à des espèces différentes. Le plus souvent, parmi ces sortes de molécules, il en est une qui prédomine dans la masse, de manière à en constituer la plus grande partie; et les autres molécules n'étant point en assez grande quantité pour masquer ou altérer notablement les caractères que cette masse emprunte aux molécules prédominantes, on considère ces molécules additionnelles comme étrangères à la masse, dont l'espèce est alors déterminée seulement par les premières molécules. La présence des autres est regardée comme accidentelle, et ne sert qu'à établir une variété de plus dans l'espèce. On voit par là que les masses qui ne sont simples qu'en apparence, peuvent, tout aussi bien que celles qui le sont en réalité, être rangées dans les divisions de la méthode minéralogique (1). On aura seulement à distinguer, parmi les individus qui composent chaque espèce, ceux qui sont réellement simples (*minéraux purs*) d'avec ceux qui sont mélangés d'une manière invisible (*minéraux mélangés*), et dont chacun est censé avoir pour fond une substance principale, accidentellement mêlée ou souillée de molécules étrangères.

Parmi les masses minérales, qui sont simples ou homogènes en apparence, il en est qui ne peuvent être rapportées avec certitude à aucune espèce minérale connue, et dont la formation est due, en tout ou en partie, à une réunion mécanique de particules dont on ne peut démêler la nature. Telles sont celles que l'on désigne par les noms d'argile, de schiste, de trapp, etc. On donne à ces masses minéralogiquement indéterminables, le nom d'*adélogènes*, pour les distinguer de celles dont les éléments sont appréciables, et qu'on appelle par cette raison *phanérogènes*. Enfin, il est des masses minérales qui sont visiblement hétérogènes, ou dans lesquelles l'œil distingue et reconnaît sans peine plu-

(1) Ce moyen que nous indiquons ici, pour faire rentrer la plupart des variétés mélangées dans les cadres tracés pour les minéraux purs, suppose qu'il y ait une des sortes de molécules qui prédomine notablement dans la masse, ce qui est généralement vrai. Il pourrait se faire cependant que, dans quelques cas, deux espèces de molécules se trouvassent mêlées en quantités numériques égales, ce qui rendrait impossible l'emploi de ce moyen. On verra plus loin, à l'article des Classifications minéralogiques, comment on parvient à se tirer de cette difficulté.

sieurs parties composantes, plusieurs masses simples d'espèces différentes, agrégées et entremêlées : ce sont les *minéraux composés* ou les *agrégats* (tels que le *granite*, le *gneiss*, la *syénite*, le *porphyre*, etc.).

Il existe dans la nature un grand nombre de masses adélogènes, comme aussi de masses phanérogènes, ou d'agrégats qui résultent de l'association de minéraux connus, réunis deux à deux, trois à trois, etc.; mais, parmi ces masses, l'histoire naturelle ne tient compte dans ses classifications, que de celles qui se présentent sans interruption sur de grandes étendues, à la surface ou dans l'intérieur de la terre, et qui, par cette raison, peuvent être considérées comme des éléments notables de la structure du globe. Les masses qui offrent ce caractère géologique, sont étudiées d'une manière toute particulière, et décrites avec soin sous la dénomination générale de *Roches*. Dans l'examen que nous allons faire des principales propriétés des minéraux, il ne sera question d'abord que des minéraux réellement simples, de ceux qui constituent les espèces minérales proprement dites.

§ 10. *De la composition moléculaire des espèces minérales, — Existence possible de deux ordres différents de molécules dans le même corps.*

A présent que nous avons reconnu l'existence de véritables espèces en minéralogie, et que nous savons que la différence des espèces est due à la diversité des molécules physiques, recherchons en quoi ces molécules peuvent différer les unes des autres; car c'est là seulement que nous pourrons trouver la source de caractères vraiment spécifiques. Les différences moléculaires proviennent en général, d'une part, de ce que les molécules physiques sont souvent elles-mêmes des groupes ou systèmes déterminés d'une autre sorte de molécules qu'on appelle molécules chimiques, et, d'une autre part, de ce que ces molécules de second ordre offrent encore ultérieurement une composition atomique très-variée, comme le prouvent les résultats des analyses chimiques.

En soumettant aux divers agents de la chimie tous les minéraux, on reconnaît que la plupart d'entre eux peuvent être décomposés en plusieurs espèces de matières, douées chacune de propriétés différentes, et sur lesquelles l'action chimique de décomposition n'a plus de prise; il en existe, au contraire, un

petit nombre que l'on n'a pu décomposer par aucun moyen, et que l'on regarde comme des substances simples ou élémentaires, tout aussi bien que celles que l'on extrait des minéraux décomposables. On donne le nom d'*atomes* aux plus petites parties matérielles, dans lesquelles les minéraux peuvent être divisés par les actions chimiques, et l'on admet autant d'espèces d'atomes élémentaires, qu'il y a de substances réputées simples. Les atomes simples d'espèces différentes, en vertu de leur affinité les uns pour les autres, se groupent en diverses proportions et de diverses manières, pour composer cette première sorte de molécules, que les chimistes nomment atomes composés, ou *molécules chimiques*, et qui, malgré leur état plus complexe, échappent à nos sens par leur petitesse extrême aussi bien que les atomes simples.

Le groupement moléculaire peut s'arrêter aux molécules chimiques dont nous venons de parler, et alors la molécule chimique et la molécule physique sont une seule et même chose. Mais il peut y avoir une sorte de surgroupement, par suite duquel plusieurs molécules chimiques semblables se réunissent ensemble pour constituer cette seconde sorte de molécule, qu'on appelle *molécule physique*, et qui, dans ce cas, est bien distincte de la molécule chimique, puisqu'elle en est un multiple. Cela tient à ce que le principe de la chaleur, auquel on attribue la séparation des molécules physiques, ne divise pas toujours les corps autant que peut le faire l'action chimique. Il en est de la molécule physique comme de la molécule chimique : elle échappe encore à nos sens et ne peut se voir qu'avec les yeux de l'esprit, c'est-à-dire à l'aide des idées théoriques qui en établissent la réalité.

Cette distinction de deux sortes de molécules, l'une chimique, l'autre physique, est de la plus haute importance au point de vue de la minéralogie : elle peut seule nous permettre d'accorder le langage de cette science avec celui de la chimie, en ce qui concerne les espèces minérales. Deux corps qui ont les mêmes molécules physiques ont par cela même des molécules chimiques identiques ; mais l'inverse n'est pas toujours vrai. Veut-on donner à entendre que deux corps sont formés des mêmes molécules chimiques, sans rien préciser sur la nature de leurs molécules physiques, on peut dire dans ce cas, avec les chimistes, que ces corps ont *même composition chimique*. S'ils ont, de plus, une molécule physique semblable, nous dirons, avec les physiciens,

qu'ils ont *même constitution physique*: ils sont alors identiques sous tous les rapports, ou, minéralogiquement parlant, de la même espèce. Mais deux corps, de même composition chimique, pouvant être constitués physiquement d'une manière différente, ne sont pas nécessairement de la même espèce au point de vue minéralogique.

§ 11. *Des analogies et des différences de la composition moléculaire.—Isomorphisme.— Modifications isomériques et polymorphiques.*

Toute molécule chimique est une combinaison définie d'atomes simples, dans laquelle chaque atome d'une espèce entre pour un certain nombre fixe. De plus, les atomes composants étant toujours arrangés entre eux dans le même ordre, cette molécule a nécessairement une forme, une structure et un type de composition déterminés. Les molécules chimiques des diverses espèces minérales, considérées quant à leur composition atomique, peuvent donc se ressembler ou différer entre elles sous trois rapports, savoir : par la nature particulière des atomes qui les composent, par le nombre particulier des atomes de chaque sorte, et par la disposition relative de ces mêmes atomes autour du centre de gravité de la molécule. Si les molécules chimiques de deux minéraux s'accordent sous les trois rapports, elles ont alors une même composition et une même nature chimique. Dans le cas où les molécules chimiques diffèrent, comme la différence peut avoir lieu sous les trois rapports à la fois ou seulement sous une partie d'entre eux, on sent bien qu'il doit exister différents degrés d'analogie ou de dissemblance entre les espèces minérales, eu égard à leur composition chimique.

Deux minéraux que l'on compare peuvent s'accorder ou différer entre eux sous les trois rapports. Dans le premier cas, leur composition chimique est bien réellement la même, et ils sont de même espèce si, de plus, leurs molécules physiques sont semblablement constituées; dans le second cas, les deux minéraux offrent la plus grande somme possible de dissemblances. Entre ces deux cas extrêmes sont compris plusieurs cas intermédiaires, plusieurs degrés de similitude dans les trois caractères fondamentaux de la composition moléculaire. Il peut arriver que les molécules chimiques de deux minéraux soient composées des mêmes atomes, unis en mêmes nombres absolus, mais différem-

ment disposés; ou bien, il peut se faire que ces molécules soient formées des mêmes atomes, unis seulement en mêmes nombres relatifs, c'est-à-dire en nombre réellement différents, mais proportionnels. Dans l'un et dans l'autre cas, les deux minéraux donneront le même résultat à l'analyse, sans être pour cela de la même espèce, puisque leurs molécules seront constituées différemment; ils auront seulement même composition chimique *apparente*.

On donne aux corps qui sont ainsi composés des mêmes parties dans les mêmes proportions relatives, et qui jouissent de propriétés spécifiques distinctes, le nom d'*isomères*. On voit qu'il faut distinguer deux cas d'isomérie, l'un qui suppose l'égalité dans les nombres absolus d'atomes composants, et l'autre seulement *dans les* nombres relatifs. Dans le premier cas, les molécules isomères ont des poids atomiques égaux; dans le second cas, ces poids sont différents, mais multiples l'un de l'autre.

Il peut se faire que les molécules de deux minéraux soient composées des mêmes atomes unis entre eux en nombres différents, comme c'est le cas des différents degrés de saturation d'un même acide par le même alcali. Enfin, il est des minéraux dont les molécules diffèrent par la nature de leurs éléments, mais paraissent formées de nombres égaux d'atomes assemblés de la même manière : tels sont le chlorure de sodium (ou sel marin) et le fluorure de calcium (ou spath fluor). Dans les deux cas dont nous parlons, la composition chimique est évidemment différente, d'après le seul résultat des analyses. Mais, dans le second cas, le type de la composition moléculaire est le même, et les deux corps sont *isomorphes*.

Dans certains minéraux, la composition chimique paraît être la même, et la diversité d'espèce ne s'annonce que par des différences dans les propriétés physiques, et notamment dans la forme cristalline dont il sera bientôt question. Les modifications offertes par ces minéraux de même composition apparente ont été appelées *polymorphiques*, parce qu'on a rapporté le changement de forme à une même substance chimique, que l'on considère comme étant polymorphe. (Ex.: le carbonate de chaux, qui présente deux formes différentes, l'une à l'état de calcaire spathique, et l'autre à l'état d'arragonite.) Mais il est probable que dans les cas de ce genre, les molécules physiques diffèrent, sinon par les molécules chimiques qui les composent, au moins par le mode de leur groupement et par la forme qui en résulte, en sorte que le poly-

morphisme ne serait qu'un nouveau cas d'isomérie, se rapportant cette fois à la molécule physique. Nous traiterons ce point avec plus de développement par la suite ; pour le moment, nous nous bornerons à faire remarquer que, s'il en est ainsi, la structure et la forme de cette dernière molécule se trouvent modifiées par le polymorphisme, et l'on est amené à voir dans ce fait, aussi bien que dans l'isomérie ordinaire, le signe d'une modification importante dans la constitution du corps, et par conséquent d'un changement dans l'espèce physique ou minéralogique.

Pour que deux minéraux soient de même espèce, au point de vue minéralogique, c'est-à-dire aient une constitution moléculaire absolument semblable, il faut, de toute nécessité, que leur composition chimique soit la même, et que, par conséquent, ils donnent le même résultat à l'analyse chimique. La *composition chimique*, telle que l'analyse peut la donner, est donc un des caractères fondamentaux de l'espèce minérale. Mais, comme on l'a vu précédemment, l'analyse chimique ne suffit pas pour nous faire connaître toutes les différences de la composition moléculaire ; il en est qui lui échappent complètement. Elle nous apprend quelle est la nature des atomes élémentaires ; quels sont, non pas les nombres absolus, mais simplement les nombres *relatifs* des atomes de chaque espèce qui entrent dans la composition des molécules ; enfin, elle se tait sur l'une des conditions les plus importantes de la composition chimique, le mode de groupement des atomes. L'analyse ne nous fait donc pas connaître la composition chimique d'une manière absolue, mais seulement d'une manière relative et incomplète. Il n'y a donc point lieu de s'étonner qu'il y ait des *composés différents*, des corps d'espèce différente, qui conduisent aux mêmes résultats d'analyse. Or, dans les cas de ce genre, les composés diffèrent toujours entre eux par l'ensemble de leurs propriétés physiques, par les caractères de la forme et de la structure cristallines, de la densité, de la dureté, de la réfraction, etc. Il est donc nécessaire d'avoir recours à ces caractères physiques et de les ranger comme caractères spécifiques à la suite de l'analyse et des autres caractères chimiques qui en dérivent, afin de suppléer par eux à l'insuffisance de ceux-ci.

§ 12. *Des caractères des minéraux.*

Les minéraux nous offrent diverses propriétés ou qualités qui servent à les reconnaître. Parmi ces propriétés, il en est de particulières à certaines espèces, et d'autres qui sont générales, mais qui ne se montrent pas dans tous les minéraux au même degré ni de la même manière. Chaque degré ou mode de qualité devient, pour le corps qui le présente, un signe distinctif, un *caractère*.

Considérés, soit dans l'ensemble des variétés qui composent une espèce, soit dans la série des espèces qui composent le règne tout entier, les caractères sont loin de présenter tous le même degré d'importance, parce qu'ils sont plus ou moins constants, plus ou moins variables. Sous ce rapport, ils peuvent être distingués en caractères de premier ordre, de deuxième ordre, de troisième ordre, etc. Cette inégalité de valeur des caractères résulte aussi très-clairement de l'influence qu'ils paraissent exercer les uns sur les autres, quand ils se réunissent dans le même être; ils ont souvent entre eux des rapports qui permettent de conclure l'existence et la modification des uns, de l'existence et de la condition des autres. Ces corrélations de caractères facilitent singulièrement la distinction du corps et la détermination de sa nature, surtout lorsqu'elles ont lieu entre les qualités externes et les propriétés qui se dérobent à l'observation immédiate; on peut alors prononcer, jusqu'à un certain point, sur la nature intime du corps, d'après son aspect purement extérieur. C'est ainsi que dans les règnes organiques on juge fréquemment des parties qui sont cachées, par celles qui sont apparentes. Les caractères qui exercent l'influence la plus marquée sur les modifications des autres, sont ce que l'on appelle les *caractères de premier ordre* ou *caractères dominateurs;* les autres sont, relativement à ceux-ci, des *caractères subordonnés*, et il en existe de plusieurs degrés.

Les caractères des minéraux peuvent se partager en deux grandes classes: les *caractères chimiques* et les *caractères physiques*, dérivant les uns des propriétés chimiques, les autres des propriétés physiques de ces corps. Les caractères chimiques sont ceux qui nous signalent la composition relative du minéral, ou tout au moins sa composition qualitative, c'est-à-dire la nature des éléments dont il se compose: ils exigent, pour se manifester, que l'on analyse une portion du minéral, ou que l'on altère sen-

siblement sa nature à l'aide du feu ou des réactifs ordinaires de la chimie. Cette classe importante de caractères n'est point susceptible de subdivision, comme la suivante.

Les caractères physiques sont ceux qui demandent pour être constatés, que l'on soumette le minéral à des mesures précises, à de véritables expériences de physique, ou tout simplement à une observation attentive, afin de bien juger de sa forme et de sa structure, et de voir comment il se comporte à l'égard des principaux agents de la nature, la pesanteur, l'attraction moléculaire, la chaleur, la lumière, l'électricité et le magnétisme. On en distingue de plusieurs genres : 1° Les *caractères géométriques* ou *cristallographiques*, qui dépendent de la mesure des angles, de l'observation des clivages et du calcul des formes polyédriques. Ils sont susceptibles d'une détermination rigoureuse, mais exigent la connaissance des procédés de la géométrie élémentaire. 2° Les *caractères physiques proprement dits*, tels que la densité, la dureté, la réfraction simple ou double, etc. 3° Enfin, les *caractères extérieurs*, qui s'apprécient immédiatement à l'aide des sens, qui s'offrent en quelque sorte d'eux-mêmes à l'observation et n'exigent aucune épreuve longue ou difficile, aucun instrument particulier, pour être constatés : tels sont les caractères de la forme en général, de la texture, de la cassure, de la transparence, de la couleur, et généralement tous ceux dont se compose ce que l'on peut appeler le *facies* ou la physionomie particulière du minéral.

Quelques minéralogistes font mention d'un cinquième ordre de caractères, sous le nom de *caractères habituels* ou *empiriques*. Ils ne sont fondés sur aucune propriété inhérente aux minéraux que l'on veut décrire, mais seulement sur certaines circonstances accidentelles, qu'ils offrent cependant assez communément, sur certaines habitudes de coloration, de gisement ou d'association avec d'autres minéraux, qui les signalent à l'observateur et conduisent à les reconnaître d'une manière purement empirique.

Les deux ordres de caractères que nous venons de distinguer sous les noms de caractères physiques et de caractères chimiques, nous offrent cette différence importante, que les uns (les caractères physiques) sont plus particulièrement propres à l'histoire naturelle des minéraux, parce qu'ils sont inhérents aux corps qui les présentent, et que ceux-ci les manifestent pour ainsi dire d'eux-mêmes, soit dans leur état présent, soit dans ces états passagers et purement physiques auxquels on peut les ame-

ner, sans altérer aucunement leur composition essentielle et leur nature chimique; tandis que les autres (les caractères chimiques) résultent toujours d'une décomposition ou d'une surcomposition, généralement d'une altération plus ou moins profonde du corps; que, par conséquent, ils ne se manifestent qu'au moment où ce corps cesse d'être lui-même et où il change de nature.

Il existe sans doute d'intimes rapports entre la minéralogie et la chimie minérale, puisque ces sciences ont toutes deux pour objet l'étude des mêmes corps (les corps inorganiques), et qu'elles se servent en général des mêmes propriétés, pour parvenir à les connaître et à les distinguer les uns des autres. Toutefois, elles diffèrent essentiellement entre elles par la manière dont elles procèdent et par l'esprit qui les dirige, par la manière dont elles usent de ces propriétés et dont elles les combinent. Dans la chimie minérale, ce sont les propriétés chimiques qui prédominent, et les propriétés physiques n'y jouent qu'un rôle très-secondaire. C'est que le chimiste n'a pas seulement en vue de savoir ce que les corps sont en eux-mêmes, mais qu'il se propose surtout de connaître ce qu'ils deviennent et en quoi ils se transforment, quand on les fait réagir les uns sur les autres. Au contraire, le minéralogiste se propose uniquement de savoir ce que sont les corps en eux-mêmes et dans leur état actuel; son rôle tient beaucoup plus de ceux du physicien et du naturaliste, et c'est ce qui fait que, dans la minéralogie, les caractères physiques ont, sinon en théorie, du moins dans la pratique, une sorte de prééminence sur les autres. Aussi, n'est-ce d'ordinaire qu'après les avoir employés, après avoir épuisé toutes les ressources qu'ils peuvent offrir, que l'on a recours aux caractères chimiques, afin de confirmer ou de compléter la détermination obtenue à l'aide des premiers. Ainsi donc, en minéralogie, on doit faire une étude toute spéciale, et suffisamment approfondie, des propriétés physiques, et c'est ce qui explique pourquoi l'on commence ordinairement par ces propriétés l'étude générale des caractères des minéraux.

Les propriétés générales des minéraux, les différents caractères qui en dérivent, ainsi que les principes fondamentaux de la science, que nous aurons à étudier successivement, peuvent se résumer en ce tableau, qui servira à indiquer la marche que nous nous proposons de suivre.

A. *Propriétés des Minéraux.*

		SUBDIVISIONS.
1. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.	Formes cristallines. Structure des cristaux. Clivages, Stries, etc.	Caractères géométriques.
	Densité. Dureté. — Elasticité. Conductibilité. — Dilatabilité. Diathormie. Réfraction et Polarisation. Polychroïsme. Fluorescence, Phosphorescence. Electricité. Magnétisme.	Caractères physiques proprement dits.
	Formes et structures accidentelles. Cassure. Transparence. Eclat. — Couleur. Actions sur les sens.	Caractères extérieurs.
2. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES.	Composition qualitative. (Réactions chimiques.) Composition quantitative. (Analyse chimique, formule atomique.)	Caractères chimiques.

B. *Principes fondamentaux de la science.*

Principes admis par Haüy.	Unité de composition ou de type chimique, dans chaque espèce. Unité de forme cristalline ou de type géométrique.
Nouveaux principes des chimistes et cristallographes modernes.	Isomérie. Polymorphisme ou Hétéromorphisme. Isomorphisme. Plésiomorphisme ou Homæomorphisme.

LIVRE PREMIER.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES MINÉRAUX.

I. CARACTÈRES GÉOMÉTRIQUES.

CHAPITRE Ier.

DES FORMES CRISTALLINES.

Les minéraux, d'après les notions établies précédemment, doivent être considérés comme des assemblages de molécules similaires, qui sont elles-mêmes des groupes atomiques, ayant chacun un *même* type de composition et par conséquent une même forme *moléculaire*. La cohésion réunit le plus souvent ces molécules entre elles d'une manière invariable, en les tenant toutefois à distance les unes des autres, et cet équilibre peut avoir lieu et se maintenir avec des dispositions très-diverses des molécules dans la masse générale. De là résultent des structures de genres différents, les unes totalement irrégulières, les autres plus ou moins régulières. Parmi celles-ci, il en est une dont nous avons déjà eu occasion de parler, et qui se distingue par des caractères tout particuliers : c'est la *structure cristalline*, ou ce qu'on peut appeler l'*état cristallin*, la cristallisation du minéral.

§ 1. *Corps cristallisés et cristaux.*

Un corps est *cristallisé*, lorsque ses molécules, dans leur arrangement en commun, ont tellement concerté leurs positions et leurs distances mutuelles, qu'elles se trouvent symétriquement

espacées sur des systèmes de plans et de lignes droites, et offrent dans leur ensemble un réseau continu et uniforme, une disposition parallélogrammique ou en quinconce, dont les figures 1 et 2, pl. I, donnent une idée pour celles de ces molécules qui sont comprises dans un même plan; la figure 3 représente le système réticulaire complet ou à trois dimensions, et montre clairement qu'il existe, à l'intérieur de la masse, des configurations polyédriques, que le clivage et d'autres phénomènes physiques peuvent rendre manifestes. Il résulte de là qu'un corps cristallisé doit se prêter avec plus ou moins de facilité à un *clivage* ou à une division mécanique de sa masse par lames ou couches planes, dans une ou plusieurs directions. Tout corps présentant une pareille disposition de molécules, et dans lequel le clivage est possible, soit réellement, soit du moins intellectuellement, est un corps *cristallisé*.

Il faut bien se garder de confondre dans une seule et même idée les *corps cristallisés* et les *cristaux*. Le mot cristal a une signification plus restreinte. Tout cristal est un corps cristallisé; mais la proposition inverse n'est pas également vraie. Le cristal est un corps que la cristallisation a marqué deux fois de son empreinte, d'abord au-dedans de la masse, puis encore à l'extérieur, en sorte qu'il présente de lui-même une première configuration polyédrique toujours en rapport avec celle que le clivage nous révèle ensuite à l'intérieur. De l'acte de la cristallisation peuvent donc résulter deux effets distincts, deux caractères essentiels, souvent réunis dans le même corps et toujours alors dans une dépendance évidente l'un de l'autre : la *structure cristalline* et la *forme cristalline*. S'ils se montrent ensemble dans un même corps, ce corps est un *cristal*; si celui-ci n'offre que le premier des deux caractères, ce n'est plus qu'un corps cristallisé, un corps à structure cristalline, et qui, comme tel, jouit de propriétés physiques particulières. Certains minéraux présentent à l'extérieur une forme polyédrique, sans aucune trace de structure régulière : ce ne sont que de faux cristaux, des *pseudomorphoses* ou formes empruntées, ainsi qu'il sera démontré par la suite.

La Cristallographie est la partie de l'étude des cristaux qui s'occupe des lois auxquelles est soumise leur structure, et de celles qui régissent leurs formes extérieures. De là deux ordres de considérations, que nous aurons à exposer successivement, celles qui se rapportent aux faits de la structure cristalline, et celles qui sont relatives aux formes cristallines. Il serait sans doute plus

rationnel de commencer par les faits de la structure, car la forme est un caractère qui est toujours subordonné à celle-ci, et nous aurons bientôt l'occasion de nous convaincre qu'il est impossible de se rendre un compte exact de toutes les modifications que l'on observe dans la symétrie des formes cristallines, sans avoir égard aux conditions particulières de structure qui les déterminent. Malgré cela, pour nous conformer à l'usage ordinaire, et aussi par la raison que la forme est un des caractères qui frappent tout d'abord les yeux lorsqu'on étudie les minéraux, nous traiterons en premier lieu des formes cristallines, avec tous les développements qu'exige l'importance du sujet : nous ne le ferons toutefois qu'après avoir donné un aperçu de la constitution physique, de la symétrie et de la structure intérieure des cristaux, afin de pouvoir entremêler de temps en temps l'étude des formes abstraites, de quelques considérations relatives à cette structure, et par là de faire disparaître les difficultés ou les anomalies apparentes qu'elle pourrait nous offrir.

§ 2. *Nature des formes cristallines. — Leur régularité ou leur symétrie purement géométrique.*

Les formes cristallines sont toujours des formes régulières ou symétriques, terminées par des faces planes et par conséquent du nombre de celles qu'en géométrie on nomme des *polyèdres*. Les faces qui les terminent sont d'ordinaire aussi polies et aussi brillantes que celles des pierres précieuses que le lapidaire a travaillées; mais nous ferons abstraction ici de leurs qualités physiques, pour ne nous occuper que de leur figure et de leur assortiment. Si l'on excepte le cas où plusieurs cristaux se sont groupés et réunis pour ainsi dire en un seul par une sorte de greffe ou de soudure naturelle, les formes cristallines sont toujours des polyèdres convexes, leurs angles étant tous saillants; ainsi l'on ne voit jamais d'angles rentrants dans un cristal simple.

Ajoutons encore que, sauf les cas assez rares où les cristaux affectent une forme tétraédrique, la symétrie de leur forme est telle, que leurs faces sont égales et parallèles deux à deux; il en résulte que généralement les cristaux peuvent, sous le rapport de la forme, sinon sous celui de la structure intérieure, être partagés en deux moitiés similaires, au moyen de plans passant par le centre.

Nous avons dit que les formes cristallines étaient toujours ré-

gulières ou symétriques, en ce sens qu'il existe toujours une certaine loi qui règle la disposition générale de leurs parties terminales, et le mode de répétition de celles de ces parties qui sont *homologues*, c'est-à-dire semblables entre elles et semblablement placées relativement au centre de figure, ou à certains axes qu'on peut appeler *axes de symétrie*. Ces axes sont des lignes droites qui se croisent au centre du cristal et qui vont aboutir soit à deux angles solides opposés, soit au milieu de deux faces ou de deux arêtes pareillement opposées. Ce sont comme les lignes principales de la charpente du cristal, celles qui règlent l'ordonnance de ses parties extérieures, et qui déterminent le nombre, la figure et les positions de chaque sorte d'angles ou de faces.

Les solides réguliers de la géométrie nous offrent le plus haut degré de symétrie qu'un polyèdre puisse atteindre. Le caractère essentiel de ces solides consiste en ce que chaque sorte de partie terminale (face, arête ou angle solide) s'y répète le plus possible, sans changer de valeur, ce qui fait qu'il n'y a dans ces sortes de polyèdres, qu'une seule espèce d'angle plan, une seule espèce d'arête ou d'angle dièdre, une seule espèce d'angle solide. On sait qu'il n'existe que cinq corps de ce genre, qui sont : le tétraèdre régulier, le cube, l'octaèdre, le dodécaèdre et l'icosaèdre réguliers. De ces cinq polyèdres, les trois premiers se rencontrent parmi les cristaux; les deux autres ne sont pas possibles, d'après les lois connues de la cristallisation.

L'irrégularité la plus grande dans les polyèdres est facile à concevoir : c'est le cas d'un polyèdre dans lequel il n'y a point de répétition de parties égales, et partant aucune disposition symétrique. Entre la régularité absolue et l'irrégularité complète, on sent qu'il existe une multitude de degrés intermédiaires; ce sont les formes plus ou moins symétriques auxquelles la plupart des cristaux appartiennent, et dont le degré ou le caractère particulier de symétrie se détermine par une certaine loi de répétition et de distribution des parties terminales (faces, arêtes ou angles solides), à l'égard d'un certain système d'axes.

Deux polyèdres peuvent être semblables de figure, ou simplement semblables de symétrie. Dans le premier cas, ils nous offrent la similitude absolue, telle qu'on la considère en géométrie; et leurs parties terminales sont non-seulement disposées de la même manière, mais encore semblables chacune à chacune. Dans le second cas, les deux polyèdres diffèrent par la figure et même par le nombre de leurs parties terminales; mais celles-ci

sont toujours ordonnées suivant la même loi, en sorte qu'il y a dans la structure de ces polyèdres une analogie de plan manifeste, un même caractère de symétrie. On verra bientôt que les formes d'aspect différent, et qui possèdent la même symétrie, sont celles qu'il est possible de rapporter à un même système d'axes et de transformer l'une dans l'autre, à l'aide de modifications, qui consistent dans le remplacement des angles ou des arêtes d'une forme, par un ensemble de facettes ayant la même symétrie que les parties qu'elles remplacent.

§ 3. *Aperçu de la constitution moléculaire des cristaux. — Conditions géométriques et physiques de leur symétrie.*

Avant de pousser plus loin l'étude des formes cristallines et la considération de leurs axes de symétrie, nous avons besoin de revenir sur ces notions fondamentales relatives à la constitution moléculaire des minéraux, que nous nous sommes contenté jusqu'ici d'emprunter aux sciences physiques où elles sont généralement admises. Nous avons besoin de les préciser davantage et de les suivre dans leurs conséquences les plus immédiates, parce qu'elles nous seront d'une grande utilité pour éclairer notre marche. On sera libre, si on le veut, de ne les accepter que provisoirement à titre d'hypothèses; mais on ne tardera pas à reconnaître qu'elles satisfont si bien à toutes les conditions des phénomènes à expliquer, qu'il ne sera plus possible de les révoquer en doute; et l'on se convaincra ainsi qu'elles réunissent à l'importance d'un premier principe, toute la valeur d'une vérité physique des mieux démontrées.

Nous avons dit que chaque molécule est un groupe de molécules plus petites ou d'atomes qui, dans la même substance, sont toujours réunis en mêmes nombres et dans le même ordre, en sorte que la molécule de chaque corps a un *type* de composition, de structure et de forme parfaitement déterminé. Les chimistes, comme les cristallographes, ont été conduits à reconnaître que la molécule de tout corps, capable de cristalliser, est nécessairement polyatomique, que ce corps soit chimiquement simple ou composé : s'il est simple, les atomes composants réunis autour d'un centre commun dans un état d'équilibre plus ou moins stable, sont semblables entre eux; en cas contraire, ils sont de nature différente. Et de même que les molécules physiques ne se touchent pas dans le réseau qui constitue le cristal,

de même les atomes pondérables ne se touchent pas non plus dans chacun de ces petits groupes moléculaires qui forment les nœuds du réseau ; il faut encore admettre qu'ils sont à distance les uns des autres : nous aurons occasion de citer bientôt des faits qui montrent clairement que les molécules physiques éprouvent, dans certains cas, de petits changements de forme et de volume, de petites dilatations ou contractions qu'on ne saurait comment expliquer, sans cette condition nouvelle.

Il suit de là que la forme des molécules physiques est déterminée par le nombre et la disposition relative des atomes, et principalement de ceux qui sont placés à la surface du groupe. Si, par la pensée, on considère à part ces atomes périphériques, ils figureront dans l'espace les sommets d'un polyèdre convexe, auquel on pourra donner le nom de *polyèdre moléculaire* : ce polyèdre sera l'enveloppe extérieure, la forme générale et représentative du groupe moléculaire. Pour le construire, il faut concevoir que par les centres de deux atomes extérieurs on mène un plan, et qu'on le fasse mouvoir jusqu'à ce qu'il vienne à passer par un ou plusieurs des autres atomes du groupe, sous la condition de laisser d'un seul et même côté tous ceux qui se trouvent en dehors du plan. Les atomes ainsi touchés par ce plan détermineront une des faces polygonales du polyèdre cherché ; et l'on aura successivement toutes les autres, en conduisant de la même manière de nouveaux plans par les côtés des faces déjà obtenues (1).

(1) Quelques savants ont soutenu l'opinion que la forme des molécules des cristaux est plutôt sphéroïdale que polyédrique (Hooke, Huyghens, Wollaston, Dana). On peut sans doute attribuer aux derniers atomes de la matière la forme sphérique, comme étant la forme la plus simple ou la plus naturelle, à moins qu'on ne préfère admettre, avec Ampère, que ces éléments extrêmes ne soient que de simples points matériels, sans volume sensible, et destinés seulement à servir de centres à des forces. Mais quant aux molécules intégrantes des cristaux, il faut de toute nécessité qu'elles aient par elles-mêmes, ou qu'elles acquièrent au moment de la cristallisation, des axes déterminés de position et de grandeur, sans quoi il serait impossible de se rendre compte des phénomènes que nous offrent les cristaux. Aussi, les partisans de cette théorie moléculaire se représentent-ils les molécules cristallines comme des sphéroïdes à axes généralement inégaux, dans lesquels un certain système de diamètres conjugués se distingue des autres, comme directions de forces prédominantes, en sorte que ces diamètres particuliers deviennent par là de véritables axes cristallographiques. (Voir le *Système de Minéralogie* de Dana, p. 147 ; 1854). Mais, s'il en est ainsi, il suffit de mener, par l'extrémité de chacun de ces diamètres, un plan tangent au sphéroïde moléculaire, pour obtenir un parallélipipède circonscrit, qui aura les mêmes axes, et qu'on pourra substituer à la molécule sphéroïdale, dans toutes les considérations théoriques, comme dans tous les calculs relatifs aux cristaux.

Supposons que quatre atomes (simples ou composés) se placent à distance les uns des autres autour d'un point central; ils figureront dans l'espace un tétraèdre (fig. 4, pl. I). Ce tétraèdre sera régulier, si les atomes composants, étant de même nature et de même forme, se sont placés à des distances égales; il sera plus ou moins irrégulier, si, par suite d'un changement dans la nature, la forme ou la direction des atomes composants, les distances des quatre atomes ne sont pas les mêmes. Six atomes, groupés autour d'un centre vide, pourront donner un octaèdre (fig. 5), ou un prisme droit triangulaire (fig. 6). Huit atomes pourront former un parallélipipède (fig. 7); douze atomes, un prisme hexagonal (fig. 8). Les molécules des corps cristallisés peuvent donc être considérées comme ayant, aussi bien que les cristaux eux-mêmes, des faces, des arêtes et des axes; elles n'exercent donc pas en tous sens des attractions égales, et l'on doit les regarder comme douées d'une sorte de polarité.

§ 4. *De la nature des axes d'un cristal, et de leurs différents degrés de symétrie ou caractères de polarité.*

Dès qu'on admet qu'un cristal est un réseau formé par un entrecroisement de files droites et parallèles de molécules polyédriques, il est bien aisé de se faire une idée juste de ce que sont en réalité (c'est-à-dire au double point de vue de la géométrie et de la physique) les faces, les arêtes et les axes d'un cristal.

Une face n'est, à vrai dire, que la dernière des lames ou couches planes de molécules, qui, par leur superposition, engendrent le réseau massif : c'est un réseau plan, tel que ceux que représentent les figures 16 et 17. Ces figures montrent en même temps que chaque lame a deux côtés (l'un supérieur, l'autre inférieur), qui peuvent être semblables ou dissemblables, selon la forme et la disposition particulière des molécules intégrantes. Cette bilatéralité des faces est un fait qu'il importe de ne pas perdre de vue : un cristal formé par la superposition de couches pareilles à celle qu'on voit figure 17, aurait évidemment ses deux faces opposées dans des conditions physiques différentes.

Une arête, un axe de cristal, n'est qu'une file de molécules polyédriques, ayant un double caractère de polarité qui dérive de la symétrie propre aux molécules mêmes : ce caractère consiste en ce qu'elles ont un certain nombre de *côtés*, égaux ou inégaux, et, en même temps, deux extrémités ou *pôles* termi-

naux, semblables ou dissemblables. La file moléculaire, représentée fig. 9, et qui est formée de prismes hexagonaux, apposés par leurs bases, a évidemment six pans ou faces latérales, six côtés égaux; en sorte qu'on peut dire qu'elle est *sex-latérale*, ou à symétrie sénaire. Si cette file est extérieure dans le cristal et commune à deux faces voisines, ce sera une *arête :* si elle passe par le centre du cristal, et qu'elle aille aboutir soit au milieu de deux faces parallèles, soit au milieu de deux biseaux ou arêtes opposées, ou aux sommets de deux pointements ou angles solides, ce sera ce que l'on nomme communément un *axe* du cristal; et, en désignant cet axe par A, on pourra marquer son caractère de symétrie latérale par le symbole A^6.

La figure 10 représente une file moléculaire composée de cubes ou de prismes à bases carrées : c'est un axe *quadrilatéral* ou à symétrie quaternaire (A^4). La figure 11 représente un axe *trilatéral* ou à symétrie ternaire (A^3); la figure 12, un axe *bilatéral*, dans lequel les côtés égaux ne se répètent que par deux, et dont la symétrie est simplement binaire (A^2). La figure 13 représente une file moléculaire, composée de tétraèdres réguliers groupés par leurs arêtes : il est aisé de voir que cette file a quatre côtés semblables, mais alternativement inverses les uns à l'égard des autres : c'est bien encore un axe quadrilatéral, mais à côtés alternes, ce que l'on peut exprimer par le symbole $_2A^2$, pour le distinguer du signe A^4, qui représente un axe dont tous les côtés sont à la fois égaux et de position semblable. La figure 14 représente de même une file de cubes ou de rhomboèdres à six côtés alternes ($_3A^3$).

On remarquera que toutes les files mentionnées jusqu'ici nous offrent deux *pôles* (faces, arètes ou pointes terminales) absolument pareils, ce que nous exprimerons en disant que les files sont *isopolaires*. Mais si les molécules composantes du cristal étaient des tétraèdres, elles formeraient dans certaines directions des files semblables à celle que représente la figure 15 : ces files auraient leurs pôles terminaux dissemblables, puisque dans chacune d'elles les molécules tournent une de leurs pointes vers une extrémité, et une de leurs faces vers l'autre : elles seraient *hétéropolaires*. Un axe hétéropolaire, du genre de celui que représente la figure 15, pourrait être désigné par le symbole $\overset{+}{\underline{A}}{}^3$.

Les conditions particulières de polarité d'un axe déterminent sa *symétrie* propre, laquelle dérive de celle de la molécule elle-même; cette symétrie se transmet ensuite à la masse du cristal,

qui la reproduit dans sa structure ; car elle n'est qu'un faisceau parallèle de files moléculaires semblables ; et de cette structure elle passe à la forme extérieure, où l'on retrouve toujours son empreinte. Les axes, on se le rappelle, vont aboutir à des parties terminales de trois sortes, qui sont : des faces simples, qu'en langage technique ou descriptif on nomme des *troncatures*, des doubles-faces ou arêtes solides (qu'on nomme des *biseaux*), des angles solides à trois ou un plus grand nombre de faces culminantes, qu'on appelle des *pointements*. Des parties de forme analogues correspondent aux côtés de ces axes. Ces trois sortes de parties terminales, prises ensemble, sont souvent nommées, et avec quelque raison, les *membres* du cristal : ce sont en effet comme des appendices extérieurs, dont la disposition et la répétition se règlent toujours sur la symétrie des axes intérieurs, aux *côtés* ou pôles desquels elles correspondent, comme la disposition des membres chez les animaux est prescrite par la forme et la symétrie du système nerveux interne.

Maintenant, le caractère de symétrie d'un axe, que l'œil reconnaîtrait directement, si nous pouvions apercevoir les molécules du cristal, peut se déterminer par un moyen indirect mais parfaitement sûr, et aussi sûr que l'intuition elle-même, par la correspondance exacte des *membres*, ou parties terminales de la forme cristalline avec les côtés ou les extrémités des axes qu'elles regardent. Ces côtés ou extrémités sont comme des espèces de *pôles ou de centres* d'action, qui exercent une influence marquée sur la configuration extérieure du cristal, dans la région tournée vers eux : la même influence, quand ils sont semblables [illegible] influence différente quand ils ne sont pas de même [illegible] pourrait comparer les pôles terminaux (ou *pôles* [illegible] dits) aux pôles des aiguilles aimantées, et les pôles [illegible] les *côtés* des axes, à ceux des rayons de lumière [illegible] position des parties terminales est donc la [illegible] rieure de la polarité des axes, et par suite de la [illegible] culaire, elle la traduit exactement et la [illegible] nos yeux. Cette disposition reste la même [illegible] cristalline puisse varier dans le même corps, [illegible] riation a toujours lieu avec conservation [illegible] ractère général de symétrie. Cela tient, [illegible] tôt, à ce que dans ce changement [illegible] membres d'espèces différentes se [illegible] les autres en mêmes nombres et [illegible]

tives; c'est en quelque sorte un phénomène de substitution qui s'opère entre des parties de forme, parfaitement équivalentes sous le rapport de la symétrie générale. Aussi, toutes les formes diverses sous lesquelles un même minéral se présente cristallisé, ont-elles la même *symétrie*, c'est-à-dire des axes en même nombre, disposés et inclinés entre eux de la même manière, et respectivement doués du même caractère de polarité.

§ 5. *Variation possible du caractère de symétrie ou de polarité dans un même système d'axes géométriques.*

Mais si le même système d'axes géométriques garde toujours le même caractère de polarité dans tous les cristaux de la même espèce minérale, il importe de remarquer que, d'une espèce à une autre, il peut changer de propriétés physiques et de polarité par conséquent, parce qu'il peut être produit par des molécules de formes différentes, assemblées d'ailleurs de manière à composer toujours un même réseau cristallin.

La figure 18, pl. I, représente un réseau à mailles cubiques, formé par des molécules de forme cubique, et composant un cristal de même forme. Dans ce réseau, chacun des trois axes rectangulaires, qui vont aboutir au milieu des faces du cristal, sont des axes isopolaires et quadrilatéraux (A^4). Il en résulte que, dans ce cristal, tous les angles solides sont physiquement identiques; il en est de même de toutes les diagonales des faces et de toutes les arêtes.

La figure 19 représente un autre réseau cubique formé de tétraèdres réguliers. Dans ces tétraèdres, aussi bien que dans les cubes, il existe des axes égaux et rectangulaires au nombre de trois : ce sont ceux qui vont aboutir au milieu des arêtes opposées. Il suffit de remplacer les cubes de la figure 18 par des tétraèdres tournés de manière que leurs axes soient parallèles à ceux des premières molécules, pour obtenir le réseau cubique, figure 19. Dans ce réseau, les trois axes rectangulaires ont un caractère différent de polarité : ce sont évidemment des axes quadrilatéraux à côtés alternes ($_2A^2$); et dans le cristal cubique, qui résulte d'un pareil assemblage, les angles solides ne sont identiques physiquement que quatre à quatre; les diagonales ne le sont que six à six, de manière qu'il existe une différence entre les deux diagonales d'une même face. Quant aux arêtes,

elles sont toutes identiques et présentent encore la symétrie bilatérale, comme celles du cube précédent.

La figure 20 représente un troisième réseau cubique formé de molécules d'une autre forme encore : ces molécules sont de petits dodécaèdres à douze faces pentagonales, toutes égales entre elles. Ces dodécaèdres, qu'on voit dans une espèce minérale très-commune (la pyrite), ne sont pas des dodécaèdres réguliers; mais ils ont encore un caractère qui les rapproche des cubes, ou des tétraèdres réguliers des deux cas précédents : c'est d'avoir trois axes égaux et rectangulaires, et c'est là ce qui permet de les ranger en un troisième réseau cubique, comme on le voit figure 20. Dans le cube total que représente cette figure, les trois axes rectangulaires ont encore un caractère de polarité tout particulier : ce sont des axes isopolaires bilatéraux (A^2). Tous les angles solides du cube sont physiquement identiques; il en est de même de toutes les diagonales et de toutes les arêtes : mais telle est la structure des files moléculaires, qui sont parallèles à l'une de celles-ci sur deux faces adjacentes du cube, que les choses ne sont plus disposées symétriquement à droite et à gauche de la même arête. En d'autres termes, il existe une différence physique entre les files de molécules qui, sur une même face, sont parallèles aux arêtes et perpendiculaires entre elles. On voit donc, par ce qui précède, qu'il existe au moins trois réseaux cubiques à molécules différentes, et, par suite, trois espèces de *cubes essentiellement* distinctes par leur structure, par le caractère de polarité de leurs axes, et, en un mot, par leur *symétrie*.

§ 6. *Division des formes cristallines. — Formes simples. — Formes composées.*

Les formes cristallines se partagent en *formes simples* et en *formes composées*. Les formes simples sont celles qui sont limitées par des faces homologues, c'est-à-dire égales, semblables et semblablement placées. Les formes composées résultent de différents ordres de faces, dont chacun se rapporte à une forme simple particulière : on leur donne souvent le nom de *combinaisons*, parce qu'elles peuvent toujours être considérées comme le résultat de la combinaison ou de la réunion en un seul tout de plusieurs formes simples. On verra bientôt comment cette espèce de combinaison est possible. Une forme composée est

donc toujours décomposable en formes élémentaires ou simples : cette décomposition est ce qu'on nomme le développement ou l'analyse des formes composées. Les arêtes ou les angles où se rencontrent les faces de deux ou d'un plus grand nombre de formes simples, s'appellent *arêtes* ou *angles de combinaison*.

Les formes simples se distinguent en deux catégories : les formes *finies* ou *closes*, dont les faces embrassent un espace fini ou limité de toutes parts, et composent par conséquent à elles seules un cristal complet : tels sont le cube, l'octaèdre régulier, le tétraèdre régulier, etc. ; et les formes *indéfinies* ou *ouvertes*, dont les faces ne limitent l'espace qu'elles comprennent que de certains côtés, et le laissent indéfini dans d'autres sens : il est bien entendu que ces dernières ne peuvent pas composer toutes seules un cristal complet, et que, par conséquent, si on les observe sur un pareil cristal, c'est qu'elles y sont en combinaison avec d'autres formes, soit fermées, soit ouvertes. Ainsi, dans le prisme hexagonal (fig. 54, pl. VI) qui représente une des formes du calcaire spathique et de l'émeraude, les six faces verticales, si on les considère seules, donnent, par leur prolongement, un prisme indéfini à six pans, qui est une forme simple ; les deux plans horizontaux, qui servent de bases dans le cristal naturel et qui sont seuls de leur espèce, donnent de même, par leur prolongement, une autre forme simple ouverte, une sorte de table ou de tranche indéfinie, limitée seulement dans le sens de son épaisseur. Ces formes indéfinies, faisant toujours partie de formes composées, sont aussi appelées, pour cette raison, des *formes partielles* (Partialformen ; Theilgestalten, Naumann).

Les formes ouvertes sont tabulaires ou prismatiques, selon qu'elles se composent de deux faces seulement, parallèles entre elles, ou bien de trois, quatre, ou un plus grand nombre de faces, toutes parallèles à un même axe placé à égales distances de chacune d'elles. Naumann a proposé le nom de *pinakoïde* pour désigner la première espèce de formes simples, que d'autres minéralogistes appellent simplement une *table*. Les formes prismatiques se distinguent par la figure de leur section transversale, qui peut être un triangle équilatéral, un hexagone régulier, un carré, un rhombe, etc. De là les noms de prismes *équilatéral*, *hexagonal*, *carré* ou *quadratique*, *rhombique*, etc. Le prisme rhombique est quelquefois, dans les combinaisons, divisé en deux biseaux ou assemblages cunéiformes de faces, qui se montrent l'un d'un côté du cristal, et l'autre du côté opposé.

Dans le cas où ces biseaux ont leur arête horizontale, ils offrent l'aspect d'un toit, ce qui fait qu'on les désigne souvent par le nom de *dôme*.

§ 7. *Nomenclature des formes simples.*

Il est bon d'avoir aussi des noms pour désigner les formes simples fermées, qui, avec les précédentes, peuvent être considérées comme les éléments de toutes les formes cristallines. Voici les règles que l'on suit ordinairement dans leur nomenclature. Les dénominations expriment tantôt la nature des faces du solide, tantôt leur nombre, et, dans quelques cas, l'aspect général de la forme.

1° *La nature des faces.* — C'est ainsi qu'on nomme *rhomboèdre*, un solide terminé par des rhombes égaux. On appelle *rhombe* ou *losange*, un parallélogramme obliquangle à côtés égaux. Il peut exister plusieurs genres de polyèdres à faces rhombes, le nombre total des faces pouvant varier. Le nom de *rhomboèdre* a été appliqué exclusivement au plus simple de tous, celui qui est composé de six faces. Tel est le solide représenté par la figure 69, pl. VII. On voit, figure 4, pl. IV, un autre polyèdre terminé par des rhombes égaux, au nombre de douze : on lui donne le nom particulier de *rhombo-dodécaèdre*.

On appelle *trapézoèdre*, un solide terminé par des trapézoïdes égaux. En géométrie, le trapèze est un quadrilatère, dont deux côtés seulement, parmi les opposés, sont parallèles. En cristallographie, un trapézoïde est un quadrilatère, dont deux côtés seulement sont égaux parmi les adjacents et non pas les quatre côtés, comme dans le rhombe. Si deux côtés adjacents étant égaux dans un quadrilatère, les deux autres sont aussi égaux entre eux, mais non avec les premiers, le trapézoïde est alors *symétrique* (fig. 31, pl. II). On voit que dans ce cas il peut être partagé par une de ses diagonales en deux triangles isoscèles, de base commune et de hauteur différente, et qu'il est *digrammique*, ou à deux sortes d'arêtes. Les figures 10, pl. IV, et 34, pl. V, représentent des trapézoèdres à douze et vingt-quatre faces symétriques. Si le cas dont il vient d'être question n'a pas lieu, le trapézoïde est *tri-grammique* ou à trois sortes d'arêtes; il est irrégulier ou non symétrique (fig. 32, pl. II). La figure 44, pl. VI, représente un trapézoèdre à vingt-quatre faces non symétriques, l'une des formes qui caractérisent le mieux la cristallisation de la pyrite commune.

On nomme *scalénoèdre*, un solide terminé par des triangles scalènes égaux. Les figures 90 et 87, pl. VIII, représentent des scalénoèdres à six, douze..... faces.

On appelle de même *isoscéloèdre* (ou *deltoèdre*), un solide composé de triangles isoscèles égaux. Tels sont les polyèdres de vingt-quatre faces représentés par les figures 6 et 12, pl. IV.

2° *Le nombre des faces.* — C'est ainsi qu'on dit : *tétraèdre, hexaèdre, octaèdre, dodécaèdre, icosaèdre,* etc., pour désigner des solides à quatre, six, huit, douze, vingt, etc., faces. Mais ces sortes de dénominations, qui expriment en un seul mot le nombre total des faces dont se compose le polyèdre, sont toujours très-vagues, parce qu'il peut se rencontrer des solides différents qui aient le même nombre de faces, celles-ci étant alors de figure différente, ou assorties diversement entre elles ; c'est pour cela qu'il est préférable d'adopter la nomenclature par les facteurs, dont Haüy et plusieurs cristallographes allemands ont fait usage, et qui, sans cesser d'être simple, est beaucoup plus précise et plus expressive que la précédente. Elle consiste à représenter le nombre des faces décomposé dans ses facteurs ou diviseurs, comme on le voit dans les dénominations complexes *hexakis-tétraèdre, triakis-octaèdre, hexakis-dièdre,* etc., qui veulent dire six fois quatre (ou vingt-quatre) faces, trois fois huit (ou vingt-quatre) faces, six fois deux (ou douze) faces, etc. Seulement nous croyons qu'on peut, pour plus de simplicité et par euphonie, supprimer la terminaison *akis* du premier terme, à l'exemple de Haüy, qui a nommé *hexa-tétraèdre* le solide à vingt-quatre faces (fig. 6, pl. IV), qui représente un cube pyramidé, c'est-à-dire un cube dont toutes les faces seraient surmontées d'une pyramide droite régulière. Nous dirons donc *hexa-tétraèdre, tri-octaèdre, hexa-dièdre,* au lieu de hexakis-tétraèdre, triakis-octaèdre, hexakis-dièdre. Ces noms n'offriront aucune ambiguïté, parce que nous aurons soin de généraliser ce mode de décomposition : on peut d'ailleurs, comme nous le faisons ici, séparer les deux facteurs par un tréma —, auquel on conviendra d'attacher la même valeur qu'au signe ordinaire de la multiplication ×. Enfin, au lieu de faire cette décomposition d'une manière arbitraire, comme les cristallographes allemands, nous proposons de choisir toujours celle que le solide nous offre comme de lui-même dans l'assortiment naturel de ses faces, de sorte que la dénomination exprime un caractère inhérent à la forme et suffisant pour la faire reconnaître. Ainsi, les figures 6 et 12, pl. IV, et 44, pl. VI, repré-

sentent toutes trois un solide à vingt-quatre faces, et comme vingt-quatre peut se décomposer en quatre fois six ou six fois quatre, en trois fois huit ou huit fois trois, en deux fois douze ou douze fois deux, on voit que ce nombre peut être exprimé par six dénominations différentes; or, le solide particulier que l'on veut désigner indique lui-même celle de ces dénominations que l'on doit choisir, parce que le nombre total de ses faces s'y montre partagé naturellement en groupes de deux ou de trois, ou de quatre faces, répétés un certain nombre de fois. Par conséquent nous appellerons avec Haüy, le cube pyramidé (fig. 6), *hexatétraèdre*, et non pas tétra-hexaèdre, comme le fait M. G. Rose, par la raison que cette forme est partagée en six groupes de quatre faces, ou qu'elle a six angles solides tétraèdres, ce qui est son caractère distinctif. Par un motif semblable, l'octaèdre pyramidé (fig. 12) sera désigné par l'expression d'*octo-trièdre,* et non par celle de *tri-octaèdre*. Le solide (fig. 44) sera nommé *dodécadièdre*, et non pas *di-dodécaèdre*. Cette dernière dénomination conviendra parfaitement au contraire pour désigner le solide fig. 58, pl. VI, parce que ses faces se partagent en deux groupes de douze faces, ou qu'il est caractérisé par ses deux angles solides dodécaèdres.

3° *L'aspect général de la forme.* — Les octaèdres à faces triangulaires ayant l'aspect de deux pyramides réunies par leurs bases, on peut les désigner par l'expression générale de *di-pyramide*, ou même (comme le font les cristallographes allemands) par celle de *pyramide*, en sous-entendant le mot *di* ou *double*. Le solide à 24 faces (fig. 6) ayant l'aspect d'un cube surmonté de pyramides, on peut, comme nous l'avons fait ci-dessus, le désigner très-bien par le mot composé de *cube pyramidé* (Pyramidenwürfel, Weiss.). De même, les solides représentés fig. 30 et 12 peuvent être désignés par les mots de *tétraèdre pyramidé* et d'*octaèdre pyramidé*.

Le solide (fig. 111, pl. IX) qui se compose de quatre triangles isoscèles égaux, présentant la double apparence d'un coin vers ses deux extrémités, a été appelé *sphénoèdre*.

Le dodéca-dièdre (fig. 44), si on le compare à l'hexa-dièdre ou dodécaèdre pentagonal (fig. 42), semble n'être rien autre chose qu'un solide de cette dernière espèce, dont les faces auraient été brisées sur une ligne correspondante à leur axe de symétrie : de là le nom de dodécaèdre à faces brisées, ou plus simplement, de *dodécaèdre brisé* (Gebrochene Dodekaeder, Weiss.)

que l'on donne quelquefois à ce solide. Pareillement, le dodécatétraèdre ou scalénoèdre à quarante-huit faces (fig. 14) pourrait être nommé *trapézoèdre brisé* (Gebrochene Trapezoëder).

Tels sont les moyens auxquels on a eu recours pour assigner des dénominations particulières aux diverses formes simples qui s'observent parmi les cristaux naturels et qui sont en nombre limité. Ajoutons que l'on a aussi cherché à classer ces formes d'après le nombre des axes de symétrie auxquels on peut rapporter l'ordonnance de leurs faces. Il existe des formes dans lesquelles chaque axe d'une espèce a des analogues de son espèce, qui le répètent dans d'autres directions, comme le cube, l'octaèdre régulier, le rhombododécaèdre, etc. On les nomme des *formes à plusieurs axes* (*Polyaxige Formen*). Il en est d'autres, au contraire, qui possèdent un ou plusieurs axes uniques dans leur espèce, ou sans analogues, comme l'octaèdre à base carrée (fig. 100), et l'octaèdre à base rhombe (fig. 126). Ce sont des *formes à un axe* (einaxige Formen).

§ 8. *Des formes composées.*

Les formes composées résultent de la combinaison d'autant de formes simples (ouvertes ou fermées) qu'il y a en elles de faces d'espèces différentes. Ces formes sont en nombre infini ; les plus importantes d'entre elles, et celles qui se rencontrent le plus fréquemment, sont les parallélipipèdes ou *prismes quadrangulaires* et les *octaèdres*. Dans les prismes en général, et par conséquent aussi dans les parallélipipèdes considérés comme prismes quadrangulaires, l'axe du prisme doit toujours être placé verticalement : les pans ou faces latérales, qui lui sont parallèles, ont par conséquent aussi une position verticale. On nomme *section transverse*, la coupe prise dans un prisme par un plan perpendiculaire à l'axe ou aux arêtes latérales. Le prisme est dit être *carré*, *rectangle*, *rhombique* ou *rhomboïdique*, selon que sa section transverse est un carré, un rectangle, un rhombe ou un parallélogramme. (Dans les mots composés, le terme *rhomboïde* sera regardé comme synonyme de parallélogramme.) Chacun des prismes que nous venons de considérer, reçoit une seconde épithète qui indique la position de sa base relativement à l'axe, ou mieux relativement aux deux sections principales. Dans un prisme quadrangulaire obliquangle, on appelle *sections principales*, celles qui passent par l'axe et par deux arêtes latérales opposées.

Si le prisme est rectangulaire, les sections principales sont celles qui sont menées par l'axe perpendiculairement à deux pans opposés. Cela posé, le prisme est *droit*, si la base est perpendiculaire à l'axe et par conséquent aux deux sections principales; le prisme est simplement *oblique*, si la base est inclinée sur une des sections principales et perpendiculaire sur l'autre; il est *doublement oblique* ou *bi-oblique*, si sa base est inclinée sur les deux sections à la fois. Ainsi, le mot *prisme* sera toujours suivi de deux dénominations adjectives, dont la première indiquera la forme de la section transverse du prisme, et la seconde la position droite ou oblique de la base. A l'aide de ces conventions, il sera facile de distinguer les nombreuses modifications de prismes quadrangulaires, qui se rencontrent parmi les produits de la cristallisation. Seulement, nous ferons remarquer que la première des deux épithètes se rapportant à la forme de la section transverse, et non à celle de la base, il pourra être utile, et même nécessaire dans certains cas, de faire connaître en outre la figure de la base. Mais cette addition n'aura lieu que fort rarement, et seulement lorsque cette figure sera d'une espèce autre que celle de la coupe transversale.

Mohs s'est servi quelquefois du mot *orthoèdre* pour désigner le parallélipipède rectangle, ou prisme rectangle droit. Par analogie et pour plus de simplicité, nous proposerons le mot de *klinoèdre* pour désigner le parallélipipède obliquangle irrégulier, que, d'après les règles précédemment convenues, il faudrait appeler *prisme rhomboïdique oblique*. Naumann et d'autres cristallographes disent aussi, par abréviation, *prisme klinorhombique* au lieu de prisme rhombique oblique. On verra bientôt l'avantage de ces termes simples, pour la désignation soit des formes fondamentales, soit des systèmes de formes, qui caractérisent les espèces minérales.

On peut aussi distinguer les diverses sortes d'octaèdres que l'on rencontre parmi les cristaux, en ajoutant au mot générique *octaèdre* deux épithètes dont l'une indiquera la forme de la *base* de l'octaèdre, considéré comme pyramide double, et l'autre marquera la position de cette base à l'égard de l'axe, ou des deux sections principales. Les arêtes d'un octaèdre à faces triangulaires se réunissent quatre à quatre sur trois plans différents, pour former autant de parallélogrammes, dont les centres répondent au milieu de trois axes qui passent par les angles solides opposés. L'un de ces axes, placé verticalement, est l'axe principal de l'oc-

taèdre. Celle des trois sections parallélogrammiques qui le coupe dans son milieu, est la *base* de l'octaèdre; les deux autres, qui passent par l'axe, sont les sections principales. Cela posé, l'octaèdre peut être *carré*, *rectangle*, *rhombique* ou *rhomboïdique*, selon la nature de cette base; il est en outre *droit*, *oblique* ou *bi-oblique*, selon que la base est perpendiculaire à l'axe, et par conséquent aux deux sections principales, ou bien inclinée sur l'une des sections seulement, ou enfin oblique sur les deux sections à la fois.

Pour les formes composées, autres que les prismes et les octaèdres, la nomenclature est moins simple et moins précise: elle n'est guère possible même que pour les combinaisons binaires de deux formes simples, dont les noms peuvent entrer dans une dénomination complexe. C'est ainsi que le mot *cubo-octaèdre* désigne la combinaison du cube et de l'octaèdre régulier, et que le mot *cubo-dodécaèdre* signifie la combinaison du cube et du dodécaèdre à faces rhombes.

§ 9. *Des formes dominantes.*

Mais à part un petit nombre de cas de ce genre, les formes composées ne peuvent plus être dénommées rigoureusement; de courtes phrases servent alors à indiquer leur génération apparente, ou la manière dont les différentes formes simples qui la constituent se comportent les unes à l'égard des autres. Dans un cristal composé, il y a en général une forme simple, ou tout au moins une forme prismatique ou octaédrique, qui *domine*, tandis que les autres formes paraissent beaucoup moins développées, et pour ainsi dire *subordonnées* à la première. Leurs faces petites, étroites, semblent avoir été ajoutées pour modifier seulement d'une manière légère l'aspect de la forme dominante, et l'on se borne à indiquer la disposition de ces *facettes secondaires* ou *modifiantes* relativement à la forme principale.

On appelle *forme dominante* d'un cristal, le solide géométrique, généralement fort simple, auquel on peut le réduire en ne considérant d'abord que ses faces les plus étendues, et faisant momentanément abstraction des facettes plus petites qui le modifient, sans altérer notablement son aspect. Lorsque l'on prolonge par la pensée les faces de la forme dominante, jusqu'à ce qu'elles s'entrecoupent au-dessus des facettes secondaires, on obtient les véritables angles et arêtes de la forme dominante, et il est

facile de voir que pour repasser de cette forme dominante complète à la forme modifiée, il faut tronquer la première sur ses angles ou arêtes par des plans coupants, dirigés parallèlement aux facettes secondaires : de là le nom de *troncatures*, que l'on a donné aussi aux facettes modifiantes, parce qu'on les considère comme des sections qui auraient fait disparaître les angles ou les arêtes de la forme dominante, supposée d'abord complète. La facette unique, ou l'ensemble de facettes, qui se montre ainsi en remplacement d'un angle ou d'une arête, est ce qu'on nomme la *modification* de cet angle ou de cette arête.

§ 10. *Modifications des formes dominantes. — Troncatures, biseaux et pointements.*

Quand la modification d'un angle ou d'une arête de forme dominante ne comprend qu'une seule facette, cette modification prend plus particulièrement le nom de *troncature*. Si la modification qui remplace un angle ou une arête se compose de deux facettes semblables et semblablement placées, qui se réunissent en un coin ou biseau, on lui donne le nom de *biseau*. Si la modification qui remplace un angle de la forme principale se compose de trois ou d'un plus grand nombre de facettes venant toutes se réunir en une pyramide plus aiguë que l'angle remplacé, on dit que cet angle a été modifié par un *pointement*. La figure 3, pl. *IV, représente un cube* dont les arêtes ont été remplacées par des troncatures; la figure 5, la même forme, modifiée sur ses arêtes par des biseaux; la figure 13, un cube, modifié sur ses angles par des pointements à six faces.

Une face de troncature est *droite* ou *oblique*, quand elle est également ou inégalement inclinée sur les deux faces qui composent l'angle ou l'arête remplacés. Quand une troncature oblique d'un angle solide est également inclinée sur les deux faces qui forment une des arêtes de cet angle, on dit qu'elle est placée *droit* ou *symétriquement* sur cette arête.

Quelques cristallographes donnent aussi le nom de *troncature tangente* à la face de troncature qui remplace une arête ou un angle solide, quand elle a la même inclinaison sur les faces de l'arête ou de l'angle. Mais cette égalité d'inclinaison n'a lieu que dans des cas assez rares; et, pour pouvoir s'appliquer à tous les systèmes de cristallisation, la dénomination précédente devrait être prise dans un sens plus large, et désigner toutes les

troncatures d'arête ou d'angle des formes prismatiques ou octaédriques, qui satisfont à la condition d'être parallèles à une section principale. On verra plus loin en effet que, cette condition remplie, la forme secondaire se déduit de la forme principale par la loi de dérivation la plus simple (1).

§ 11. *Des zones de faces.*

A l'aide de ces dénominations convenues, il sera facile de décrire les cristaux, d'après leur forme dominante et les modifications de ses parties terminales. Mais on peut encore les considérer sous un point de vue différent et les analyser d'une toute autre manière. Il arrive, en effet, très-souvent que dans les formes composées, les différentes faces sont tellement liées entre elles, que l'on peut parcourir en différents sens des *zones* ou ceintures de plans consécutifs, qui tous se coupent mutuellement dans des arêtes parallèles, comme les faces latérales d'un prisme. Un cristal peut donc être décomposé en plusieurs séries de faces, dont chacune soit une *zone;* la considération de ces zones facilitera beaucoup la description du cristal, et, comme on le verra plus loin, la détermination successive de ses différentes faces, en procédant du connu à l'inconnu.

§ 12. *Nature des imperfections des formes cristallines. — Difficultés que présente leur détermination.*

Nous avons dit que les formes des cristaux naturels étaient généralement remarquables par leur régularité ou la symétrie avec laquelle leur parties terminales se trouvaient disposées. Nous devons cependant nous hâter de le dire : il ne faut pas s'attendre à ce que les cristaux présentent toujours au même degré cette perfection, cette égalité dans l'étendue des faces et des arêtes correspondantes, que l'on observe chez quelques-uns, et que nous prenons soin d'établir constamment dans les figures de nos planches ou les modèles en bois de nos collections : ceux-ci représentent en effet l'état normal de la substance cristallisée, la limite de perfection vers laquelle elle tend en vertu des seules forces de la cristallisation, la symétrie de sa forme molécu-

(1) Celle qu'Haüy aurait appelée, un *décroissement par une rangée* sur l'angle ou sur l'arête de la forme primitive. Voyez, plus loin, ce qui concerne les lois de dérivation des faces secondaires.

laire, et sans doute aussi du cristal à son origine; symétrie que ce dernier eût conservée sans altération pendant toute la durée de son accroissement, si des causes étrangères, des actions perturbatrices, n'eussent empêché la masse de croître uniformément de tous les côtés à la fois.

Il faut se rappeler en effet qu'un cristal n'est jamais produit d'un seul jet; qu'il commence toujours par être pour ainsi dire à l'état embryonnaire, et tend ensuite à s'accroître sans changer de forme; c'est du moins là ce qui a lieu le plus ordinairement. Or, supposons que les molécules d'un cristal aient la forme ou du moins la symétrie du cube, et qu'en vertu des forces de la cristallisation elles soient sollicitées à prendre un arrangement de forme cubique; il pourra arriver sans doute que dans la première *période* de l'accroissement du cristal, celui-ci présente réellement l'apparence d'un cube, que par conséquent ses arêtes soient toutes égales, et que ses faces soient des carrés; mais il pourra se faire aussi que l'accroissement du cristal soit gêné d'un côté par quelque obstacle, tel que le contact d'un corps étranger, et qu'il ait lieu, au contraire, librement par les autres côtés; dès lors, cet accroissement cessant d'être uniforme, le cristal prendra plus d'allongement dans certains sens, et passera de la forme cubique à celle d'un parallélipipède rectangle à côtés inégaux.

Telle est la cause la plus ordinaire des déformations, des défauts apparents de symétrie, qui se rencontrent dans les cristaux *des laboratoires*, comme dans ceux de la nature, et qui font qu'il n'y a peut-être pas un seul cristal naturel qui soit un cube ou un rhomboèdre parfait, en prenant ces mots selon la définition géométrique, c'est-à-dire qui soit un parallélipipède à côtés rigoureusement égaux. Cependant, il nous arrivera souvent d'être conduits à considérer certains prismes rectangles comme des cubes, certains prismes obliquangles comme des rhomboèdres : mais ce ne sera point par suite d'une détermination de la forme, obtenue immédiatement en mesurant les dimensions linéaires du cristal, mais bien par une voie en quelque sorte indirecte, par des considérations cristallographiques, qui nous mettront à même de nous convaincre que la forme ainsi appréciée est bien celle qui convient à la molécule et à la structure du cristal, celle qu'il aurait accusée lui-même d'une manière non équivoque, si la cristallisation s'était opérée lentement et sans aucun trouble.

Il résulte de là que beaucoup de cristaux ne sauraient être

pliquant exactement sur les faces de cet angle; les seconds doivent leur dénomination à ce que la condition nécessaire, pour obtenir par leur moyen la mesure exacte d'un angle, est de faire coïncider l'image d'un objet, vu par réflexion successivement sur l'une et l'autre face de l'angle, avec celle d'un autre objet aperçu directement.

§ 1. *Goniomètre ordinaire.*

Le goniomètre d'application, nommé goniomètre de Carangeot et goniomètre ordinaire, parce qu'il a été imaginé en 1783 par Carangeot, l'un des collaborateurs de Romé de l'Isle, et qu'on le trouve communément entre les mains des minéralogistes, est le seul qu'on ait employé pendant longtemps, et dont Romé de l'Isle et Haüy aient fait exclusivement usage. Il se compose de deux parties : 1° de deux lames ou alidades en acier (fig. 21, pl. II) mobiles autour d'un axe *a*, et qu'on peut faire glisser l'une sur l'autre au moyen des rainures *r*, *r*, pour allonger ou raccourcir à volonté les portions qui servent à mesurer les angles; 2° d'un demi-cercle ou rapporteur (fig. 22) en cuivre ou en argent, divisé en 180°, et dont le diamètre offre une cavité *c* à son centre, et une petite saillie *p* vers la droite. Ces deux parties, dans les anciens goniomètres, étaient constamment fixées l'une à l'autre; dans ceux que l'on exécute maintenant, elles sont séparées, mais peuvent se réunir, comme nous le dirons un peu plus bas. Pour mesurer un angle avec cet instrument, on tient le cristal de la main gauche, et de la droite les alidades, laissant entre elles une ouverture à peu près égale à l'angle que l'on cherche. On se place devant une fenêtre et l'on élève le cristal à la hauteur de l'œil, en dirigeant l'arête de l'angle perpendiculairement à la fenêtre; puis on applique les lames par leur tranche sur les deux faces, en ayant soin qu'elles soient bien perpendiculaires à l'arête, et avec l'index on fait varier, s'il en est besoin, leur ouverture, jusqu'à ce qu'elles ne laissent aucun jour entre elles et les plans qu'elles recouvrent. Cela fait, on les pose sur le rapporteur, de manière que l'axe *a* entre dans la cavité centrale *c*, et la saillie *p* dans la rainure de l'une des alidades, qui se trouve alors placée sur le diamètre, comme on le voit figure 23. Il ne s'agit plus alors que de lire sur le limbe le degré d'ouverture des deux lames, pour avoir la valeur de l'angle que l'on veut déterminer.

Le goniomètre ordinaire a l'avantage de donner rapidement une approximation, assez grossière à la vérité, mais dans certains cas suffisante, de la valeur d'un angle. S'il ne s'agit par exemple que de reconnaître une variété de forme, et de la rapporter à une espèce dont les cristaux ont été une première fois bien déterminés, on peut s'en servir très-utilement, même aujourd'hui que l'on possède des instruments beaucoup plus parfaits, mais d'un emploi moins prompt et plus difficile. S'agit-il au contraire de déterminer les caractères d'une espèce nouvelle, il faut dès-lors préférer les goniomètres à réflexion, qui peuvent donner la valeur des angles à une minute près, tandis qu'avec le goniomètre ordinaire on ne peut espérer les avoir qu'à un quart de degré près, dans les circonstances même les plus favorables. Les imperfections de ce dernier goniomètre tiennent d'abord, à ce qu'on ne peut pas vérifier si l'instrument a été bien ajusté, c'est-à-dire si l'on a satisfait aux deux conditions nécessaires, de la perpendicularité des lames sur l'arête, et de leur parfaite coïncidence avec les faces du cristal; en outre, à ce qu'il ne peut s'appliquer qu'aux cristaux un peu gros, pour lesquels ces conditions ne sauraient souvent avoir lieu, car les cristaux volumineux sont généralement beaucoup moins parfaits que les petits cristaux, et leurs faces, au lieu d'être lisses, sont composées fréquemment de portions de lames parallèles entre elles, mais placées sur des plans différents, ce qui rend l'application des alidades inexacte. Les goniomètres à réflexion, au contraire, peuvent être employés à mesurer les cristaux les plus petits, et même ceux dont les faces sont chargées de lamelles, parce que le parallélisme de ces lamelles permet à la lumière de se réfléchir aussi régulièrement qu'elle le ferait sur un plan unique.

§ 2. *Goniomètres à réflexion.*

L'idée de faire servir la réflexion des images à la mesure des angles est assez ancienne, et plusieurs physiciens y ont eu recours, entre autres Charles, Malus et Wollaston. Haüy lui-même, qui a toujours montré une grande prédilection pour le goniomètre ordinaire, avait basé sur cette même idée un procédé dont il a fait souvent usage, pour déterminer un angle d'un fragment de cristal, par comparaison avec celui d'un autre cristal qu'il connaissait d'avance. C'était le soir qu'il opérait. Il fixait sur un socle avec de la cire le cristal à déterminer à côté de celui qu'il

prenait pour terme de comparaison, en donnant une position horizontale aux arêtes des angles mis en rapport, et en faisant en sorte que l'œil vît coïncider les reflets de la lumière d'une bougie sur deux des faces correspondantes des cristaux; puis il faisait tourner l'assemblage des deux cristaux, jusqu'à ce que le reflet se montrât sur la seconde face de l'angle cherché; et s'il y avait de nouveau coïncidence de ce reflet avec celui de la seconde face du cristal voisin, il en concluait l'égalité des deux angles.

Les goniomètres à réflexion sont fondés sur un principe semblable : ils donnent les moyens de mesurer un angle, en faisant tourner le cristal autour de l'arête de cet angle, depuis une position déterminée de l'une des faces, jusqu'à ce que l'autre face ait pris exactement la même position; et cette position se détermine par la coïncidence de deux images, observée successivement sur les deux faces, au commencement et à la fin de la rotation, d'un point où l'œil est demeuré fixe. La quantité de la rotation, mesurée sur un cercle perpendiculaire à l'arête, donne la valeur du supplément de l'angle cherché, c'est-à-dire de ce qu'il faut y ajouter pour faire 180°. Il est clair que ces instruments ne s'appliquent immédiatement qu'aux cristaux dont les faces sont réfléchissantes, ce qui est, au reste, le cas de la plupart des substances cristallisées. Ils ne servent pas seulement à mesurer les angles des faces naturelles des cristaux avec un degré de précision que les autres goniomètres ne sauraient atteindre; ils ont encore l'avantage de pouvoir servir à déterminer plusieurs de leurs propriétés optiques, ainsi qu'on le verra plus loin, lorsque nous traiterons de l'étude de ces propriétés.

Le goniomètre proposé par Wollaston étant celui de tous qui réunit le plus d'avantages, sous le rapport des applications à la Minéralogie, nous nous bornerons à le faire connaître, en le présentant d'abord tel que l'a conçu cet illustre physicien. Nous exposerons ensuite les précautions importantes qu'il faut prendre pour assurer, autant que possible, l'exactitude des mesures, et les modifications que dans ce but plusieurs observateurs ont introduites dans la disposition soit de l'opération, soit de l'instrument lui-même, sans altérer pour cela leur nature; puis nous terminerons en indiquant ce qu'il faut faire, pour tirer le parti le plus avantageux possible des résultats que l'on obtient, en variant et répétant un grand nombre de fois la mesure d'un même angle.

Le goniomètre de Wollaston, représenté figure 25, se compose de deux parties essentielles : 1° d'un cercle entier, divisé sur sa tranche en degrés et demi-degrés, et placé verticalement sur un axe cylindrique *k l*, que l'on peut faire tourner sur lui-même en entraînant le cercle, au moyen de la virole V ; 2° d'une série de pièces qui constituent, à proprement parler, le support du cristal. Ce support se compose d'un second axe qui traverse longitudinalement le premier, et tourne avec lui quand on fait mouvoir la virole V, mais peut aussi se mouvoir seul au moyen d'une autre virole plus petite *v* ; plus, d'un prolongement vers la gauche, qui comprend plusieurs pièces à mouvements rectangulaires, savoir : deux pièces en forme d'étrier *r*, *s*, mobiles l'une sur l'autre dans leur point de jonction, et une troisième en forme de *tige t, portée* par la seconde pièce de l'étrier, pouvant tourner sur elle-même par le moyen de la virole *v'*, et dont l'extrémité est fendue pour recevoir une petite platine (ou porte-objet) *p*, sur laquelle ou contre laquelle on colle le cristal avec de la cire.

La quantité dont le cercle tourne, lorsqu'on fait mouvoir la grande virole V, se mesure par l'arc que décrit le zéro mobile de sa division, en s'éloignant de l'index d'un vernier fixe *g h*, placé à la droite du cercle, et auquel le zéro correspondait primitivement. Ce vernier est un petit arc de cercle qui est divisé dans le même sens que le limbe en trente parties égales, qui équivalent *exactement* à vingt-neuf des parties du limbe. Si l'on suppose que les deux divisions marchent de haut en bas du côté de l'observateur, que le cercle se meuve de manière que son zéro, placé de ce même côté, aille en montant ou en s'éloignant, et qu'une fois le mouvement terminé, l'index (ou la ligne *o* du vernier) tombe un peu au-delà d'une des divisions du limbe, la quantité de la rotation comprendra alors le nombre de degrés ou de demi-degrés marqué par la division du limbe qui se trouvera immédiatement au-dessous de l'index, plus un nombre de minutes indiqué par le chiffre de la ligne du vernier, qui se trouvera alors en coïncidence avec une des lignes du limbe. On a donc la valeur de l'arc décrit exprimée en degrés et minutes, en lisant les degrés sur le cercle, et les minutes sur le vernier.

Voici maintenant comment on doit opérer, suivant Wollaston, pour avoir la mesure de l'angle d'un cristal donné. On place l'instrument sur un plan horizontal devant une fenêtre

ouverte, et en face d'un bâtiment assez éloigné, offrant au moins deux lignes horizontales parallèles, une supérieure et une autre inférieure, qui serviront de lignes de mire; ou bien, si l'on est forcé d'opérer dans une chambre fermée, on place l'instrument sur une table, à quatre ou cinq mètres de distance d'une fenêtre, en prenant pour mire supérieure un cordon tendu horizontalement au milieu d'un carreau de vitre, et pour mire inférieure la ligne d'intersection du mur avec le parquet. En plaçant l'œil dans le plan du cercle, on dirige l'instrument de manière que ce plan soit perpendiculaire aux mires que l'on a choisies (nous dirons plus bas comment on vérifie si cette condition importante est exactement remplie). On fixe le cristal avec de la cire sur la platine *p*, de manière que l'une des faces de l'angle à déterminer, et par conséquent aussi l'arête de cet angle, soit dirigée dans le plan de cette plaque; il suffit alors de faire avancer sur elle-même la tige *t*, dans un sens ou dans l'autre, pour que l'arête dont il s'agit, que l'on a déjà cherché à rendre autant que possible perpendiculaire au plan du cercle, aille passer par son centre, si elle était suffisamment prolongée. Maintenant on approche l'œil assez près du cristal, pour qu'en cessant de distinguer nettement la forme de ce cristal, il aperçoive au contraire d'une manière très-distincte les images des objets réfléchis par ses faces. On tourne le cristal au moyen de la petite virole *v* jusqu'à ce qu'on voie sur la première face de l'angle, l'image de la mire supérieure *mn* coïncider avec la seconde mire *m'n'*, vue directement au-delà du cristal. Si ces deux lignes ne paraissent point parallèles, on les amène à coïncider l'une avec l'autre, en tournant légèrement sur son axe la tige *t*, qui doit avoir été placée d'abord parallèlement au plan du cercle. On a, par cette coïncidence, ajusté la première face de l'angle, c'est-à-dire qu'on l'a rendue parallèle aux mires, et par conséquent perpendiculaire au plan du cercle, puisqu'on suppose que ce cercle a d'abord été dirigé lui-même perpendiculairement sur les mires. On ajuste ensuite la seconde face de la même manière, en ayant soin toutefois, pour produire la coïncidence exacte des deux images, de ne point toucher à la tige *t*, comme dans le premier cas, mais de mouvoir latéralement la partie *s* de l'étrier, de manière à la rapprocher ou à l'écarter du cercle. Ce second mouvement se faisant autour d'un axe perpendiculaire à la première face ajustée, celle-ci se meut dans son propre plan; on est donc certain d'avoir ajusté la seconde face sans avoir détruit l'ajustement de la première.

Il ne s'agit plus maintenant que de mettre le zéro du cercle sur l'index ou zéro du vernier, en tournant le cercle au moyen de la grande virole V, et quand le cercle est ainsi à zéro, de tourner la petite virole *v* jusqu'à ce qu'on ait retrouvé pour l'œil la coïncidence des mires sur la première face. Alors, l'œil ne bougeant plus, on fait tourner le cercle et en même temps le cristal, jusqu'à ce que l'on observe de nouveau la coïncidence des images sur la seconde face. On lit sur le limbe et le vernier le nombre de degrés et de minutes, qui mesure la rotation qu'a subie le cristal; ce nombre exprime le supplément de l'angle cherché. En le retranchant de 180°, on a la valeur de l'angle lui-même.

Le docteur Kupffer a fait un travail très-intéressant sur la théorie du goniomètre de Wollaston, il a cherché à apprécier par le calcul toutes les causes d'erreur qui peuvent influer sur le résultat de l'observation (1). Il résulte de ce travail, que les conditions à remplir, pour assurer l'exactitude des mesures, sont: que l'arête du cristal soit bien parallèle à l'axe de l'instrument et qu'elle passe par le centre, ou, du moins, n'ait qu'une très-faible excentricité; que les mires soient toutes deux à une grande distance et, autant que possible, à une distance égale du cristal, surtout si elles ne sont pas très-éloignées; que le cristal soit très-petit, et que, dans tous les cas, la réflexion sur les deux faces ait lieu très-près de l'arête. La petitesse du cristal et le grand éloignement des mires sont des conditions essentielles; lorsqu'elles sont *remplies, la fixité* de l'œil n'est plus nécessaire, pas plus qu'elle ne l'est dans les observations que l'on fait en mer avec les instruments de réflexion.

Pour vérifier si le plan du cercle a été dirigé perpendiculairement aux deux mires, ce qui est, comme on l'a vu, un préliminaire indispensable, on peut employer le moyen suivant que propose M. Kupffer. On colle sur la platine un petit morceau de verre noir ou de gypse à faces bien parallèles, et l'on cherche à obtenir la coïncidence des images sur les deux faces successivement, en changeant, si cela est nécessaire, la position du cercle. Quand la double coïncidence a lieu, on est sûr que les deux faces du verre sont parallèles aux lignes de mire et en même temps

(1) Voyez l'ouvrage qui a pour titre: *Preisschrift über Genaue Messung der Winkel an Krystallen*, Berlin, 1825, et le *Handbuch der rechnenden Krystallonomie*, du même auteur, in-4°, Saint-Pétersbourg, 1831.—Voyez aussi: *Lehrbuch der reinen und angewandten Krystallographie*, de Naumann, 2e vol., p. 363.

perpendiculaires au cercle, et que, par conséquent, celui-ci est lui-même perpendiculaire aux deux lignes.

Comme il est nécessaire aussi que le cercle soit bien vertical, il est bon, pour mieux assurer sa verticalité, que le pied de l'instrument soit muni de vis à caler et de petits niveaux à bulle d'air.

Le travail de M. Kupffer a encore servi à mettre en évidence plusieurs faits importants. En opérant avec le plus grand soin et dans les circonstances les plus favorables, il a toujours obtenu, lorsqu'il répétait un grand nombre de fois la mesure, des différences tantôt en plus et tantôt en moins, qui allaient d'ordinaire à quelques minutes, et ce n'est qu'en prenant un résultat moyen entre tous les résultats particuliers, qu'il pouvait avoir, à une minute près, la valeur de l'angle cherché. On voit donc la nécessité d'appliquer à ces mesures, si l'on recherche une grande précision, ce principe, si utilement suivi dans d'autres parties de la physique, qui consiste à faire un grand nombre de répétitions de la mesure, pour prendre ensuite la moyenne entre toutes les valeurs observées du même angle. On parvient ainsi à atténuer presqu'entièrement les erreurs qui dépendent de nos sens, ou d'une mauvaise graduation de l'instrument. Après avoir fait une première mesure, on remet, au moyen de la virole v, le cristal dans la première position, sans faire tourner le cercle, et l'on mesure à nouveau, en faisant tourner le cercle avec la virole V. Il est clair qu'on aura une seconde valeur de l'angle, si l'on retranche du nombre donné par la nouvelle lecture, celui de la lecture précédente. On peut continuer ainsi un grand nombre de fois, en partant toujours du point où le cercle est arrivé dans l'opération précédente, et faisant parcourir successivement aux observations toutes les parties du limbe. On peut se contenter de ne faire qu'une seule lecture à la fin de l'opération, ce qui donnera de suite l'arc total ou la somme des répétitions, si l'on tient compte toutefois des circonférences entières parcourues. Mais on verra plus loin qu'il peut être très-avantageux de connaître la valeur des répétitions successives; pour cela, il faut lire après chaque opération, en prenant la différence de la dernière lecture à celle qui précède, et ayant soin d'ajouter auparavant 360° à la dernière lecture, toutes les fois qu'on repasse par 0°.

Non-seulement le travail de M. Kupffer nous montre qu'au moyen du goniomètre de Wollaston et du principe des répétitions on peut avoir la valeur d'un angle à une minute près, il

nous apprend encore que dans les cristaux que l'on regarde comme les plus parfaits, il y a quelquefois dans le même angle pris sur plusieurs cristaux de la même espèce, ou dans des angles mesurés sur le même cristal et qui devraient être égaux entre eux, des variations qui s'étendent jusqu'à une minute, et qu'il faut attribuer aux imperfections de la cristallisation. Il suit de là que dans les déterminations cristallographiques, la nature des objets que l'on étudie ne comporte pas une exactitude au-delà des minutes. Il serait donc inutile, en minéralogie, de recourir à des instruments plus parfaits que celui de Wollaston, ce serait réellement chercher une précision illusoire.

La disparition des erreurs dans les moyennes prises entre un grand nombre d'observations exige que ces erreurs se répartissent également dans les deux sens opposés, c'est-à-dire qu'elles puissent être également positives et négatives. Or, parmi les erreurs d'ajustement du cristal, il en est une, celle qui provient de l'excentricité de l'arête, qui change de signe sans changer de grandeur, lorsqu'en maintenant l'ajustement du cristal et les distances des objets à l'axe du cercle, on fait en sorte que, dans une première opération, l'arête se trouve d'un côté de l'axe par rapport à l'observateur, et que dans la seconde elle se trouve du côté opposé. Cette remarque est due à M. Richter. Il est donc possible d'annihiler complètement cette erreur par deux opérations conjuguées. M. Weisbach a proposé pour cela un moyen, que Mohs a adopté de son côté, comme nous le verrons ci-après, et qui consiste à prendre successivement des lignes de mire aux mêmes hauteur et distance horizontale, sur les fenêtres opposées d'une grande chambre, au milieu de laquelle le goniomètre est placé, et à observer en se tournant alternativement d'un côté et de l'autre. Mais, l'emploi des doubles mires étant peu commode, il vaut mieux recourir, avec M. Naumann, à la méthode du retournement, dont on fait souvent usage en astronomie et qui conduit au même but. On observera la première fois, comme on le fait ordinairement, c'est-à-dire de manière que le cristal soit à la gauche du cercle; puis, sans changer soi-même de place, on fera faire à l'instrument une demi-révolution autour de la verticale, de manière que le cristal passe à la droite du cercle, et l'on observera de nouveau en se servant des mêmes mires. Si l'on prend alors la moyenne des deux observations, l'erreur due à l'excentricité aura complètement disparu (1). La théorie du go-

(1) Voyez *Annales de Poggendorf*, 1831, cah. 7, p. 395.

niomètre fait voir que pour une observation isolée cette erreur atteint son maximum, quand l'une des faces du cristal passe par l'axe de l'instrument, et qu'elle est nulle, au contraire, quand les deux faces sont également éloignées de cet axe, ce qui leur permet de se substituer exactement l'une à l'autre dans l'opération de la mesure, par la rotation du cristal.

Nous avons toujours supposé jusqu'ici, avec Wollaston, l'emploi de deux lignes horizontales prises à une grande distance au-delà du cristal, l'une au-dessus et l'autre au-dessous de l'œil de l'observateur. Mais le choix et la disposition des objets de mire sont susceptibles de modifications, qui ont l'avantage de rendre l'opération plus commode et même plus exacte. On peut ne prendre à distance qu'une seule ligne de mire, savoir, la supérieure, et remplacer la seconde par un petit miroir *s*, fig. 26, placé un peu en avant du cercle et tournant autour d'un axe parallèle à celui de l'instrument. Ce miroir reproduit l'image de la mire supérieure à la même distance en dessous que cette mire est en dessus, et c'est sur cette image que l'on fait coïncider celle que donne la face du cristal. On satisfait par là à l'une des conditions dont nous avons parlé plus haut, l'égalité de distance des deux mires par rapport au cristal (1).

On peut encore suppléer à la seconde ligne de mire, soit par une alidade ou un tube garni de pinnules à ses extrémités, et au moyen duquel on visera le cristal, soit par une lunette (fig. 27) contenant dans son intérieur un fil horizontal, sous lequel l'image de la mire doit venir se placer. Le foyer de la lunette est réglé de façon que l'on puisse voir nettement la mire, lorsqu'on dirige sur elle la lunette. Cette lunette a pour support un cylindre qui entre à frottement dans une colonne en cuivre, et sur lequel elle peut tourner verticalement par un mouvement de charnière : elle doit être dirigée sur le cristal dans un plan parallèle à celui du cercle. La lunette a l'avantage de donner des résultats très-précis, mais il devient presque impossible de s'en servir, quand les cristaux sont d'une grande petitesse, ou quand leur pouvoir réfléchissant est très-faible.

Enfin on peut, avec M. Kupffer, prendre pour mire un simple point, au lieu d'une ligne, et amener son image réfléchie par les faces du cristal à coïncider avec le point d'intersection de deux fils croisés dans l'intérieur d'une lunette. Le goniomètre de

(1) Kupffer, ouvrage déjà cité, et Degen, *Ann. de Poggendorf*, t. XXVII, 1833.

M. Kupffer a trois vis à caler à son pied (fig. 27); il est placé sur une planche triangulaire qui porte dans un de ses angles la colonne qui sert de support à la lunette. Pour ajuster l'instrument, on dirige la lunette de manière qu'elle soit parallèle au cercle, et l'on donne à celui-ci une position telle que son plan suffisamment prolongé aille passer par l'objet. On place sur la platine le petit verre plan à faces parallèles, dont nous avons déjà plus haut indiqué l'usage, et au moyen des vis du pied on cale l'instrument de telle sorte, que l'image de l'objet réfléchie successivement par l'une et l'autre face de cette petite lame, aille tomber dans la croix de la lunette. Cela fait, on enlève le petit verre plan, pour mettre à sa place le cristal dont on veut mesurer un angle. Dans cette manière d'opérer, on peut prendre pour mire un point très-éloigné, comme la pointe d'un clocher à l'extrémité de l'horizon, ou même un astre dans le ciel.

Toutes les méthodes précédentes semblent supposer que les faces du cristal sont assez brillantes pour faire, en plein jour, l'office de miroir, nous allons voir comment on peut les étendre au cas des cristaux à faces peu réfléchissantes, et même à celui des cristaux à faces tout-à-fait mates. Si les faces ont un éclat très-faible, mais suffisant néanmoins pour donner des images sensibles, il faut, pour rendre l'opération plus facile, éviter de respirer sur le cristal et d'y porter les doigts, de peur qu'il ne se ternisse par l'effet de la transpiration. On pourra d'ailleurs accroître la sensibilité des images, soit en augmentant l'obliquité de la réflexion, soit surtout en ne laissant arriver sur le cristal que la lumière qui passe par la mire ou à peu de distance autour d'elle. Pour remplir cette dernière condition, on recouvrira le cristal d'un écran qui sera percé d'une ouverture convenable tournée vers la mire, ou mieux encore, on opèrera dans un lieu sombre, en prenant pour mire une ligne transparente, telle qu'une fente très-étroite au milieu d'un écran appliqué contre les vitres d'une fenêtre. Il y a en effet un grand avantage à choisir, au lieu d'une ligne opaque se détachant sur un fond clair, une ligne brillante placée sur un fond complètement obscur. Si l'obscurité dans laquelle on opère est telle qu'on ne puisse lire les degrés et minutes sur le cercle, on disposera alors une lampe dans le voisinage de l'instrument, de telle sorte que sa lumière éclaire le limbe, sans porter sur le cristal.

La remarque que nous venons de faire nous indique la pos-

sibilité de remplacer la lumière du jour par une lumière artificielle, que l'on pourrait recevoir de même à travers une fente très-étroite ; on concoit que l'on puisse facilement obtenir ainsi, ou par d'autres moyens, une fente ou ligne lumineuse dans l'obscurité; et en s'attachant à rendre son éclat le plus vif possible, on aura une mire dont le reflet sera sensible sur beaucoup de cristaux qui, au jour, paraîtraient ternes. L'emploi d'une lumière artificielle aurait donc le double avantage d'étendre les applications du goniomètre à un plus grand nombre de corps, et de rendre l'observateur indépendant des circonstances atmosphériques, en lui permettant d'opérer à tout moment et en toute saison. Un des moyens les plus simples d'opérer le soir dans une chambre fermée avec le goniomètre de Wollaston, c'est de placer dans le plan de réflexion parallèle au limbe, des bougies dont la flamme servira de point de mire; une seule, si le goniomètre est pourvu d'un miroir, et, dans le cas contraire, deux bougies l'une au-dessus de l'autre et assez éloignées, pour que les images de leurs flammes puissent être amenées à coïncidence au moyen du cristal.

Les diverses précautions dont nous venons de recommander l'usage réduiront considérablement le nombre des cristaux pour lesquels le goniomètre à réflexion ne pourra pas être d'une application immédiate, à raison de l'éclat trop faible ou tout-à-fait nul de leurs faces. Mais pour ceux-ci même, il est possible de se servir de cet instrument, en faisant subir à leurs faces une préparation convenable, par exemple en y étendant un vernis transparent; ou bien encore, en y collant avec un peu de térébenthine de petites lames de verre, ou des lamelles à plans parallèles. Si les faces, quoique ternes, sont bien unies, ces lames pourront s'y appliquer assez exactement, et les mesures qu'on obtiendra par leur moyen auront un degré suffisant de précision (1).

M. Mohs a opéré, dans la disposition du goniomètre de Wollaston, un changement, qui, sans détruire le caractère propre de cet instrument, le rapproche de l'ancien goniomètre de Charles. Le cercle est replacé horizontalement (fig. 28), comme il l'était dans ce dernier goniomètre et dans celui de Malus; l'instrument

(1) M. Riese a publié à Bonn, en 1829, la description d'un nouveau goniomètre, d'une structure assez compliquée, pourvu de deux microscopes, et qui, selon lui, est applicable aux cristaux mats comme aux cristaux réfléchissants.

est muni de niveaux à air et de vis à caler. Les viroles sont au-dessous du cercle, et en dessus est un axe vertical servant à supporter le cristal, contre lequel on doit appliquer l'œil. Afin de compenser par une double mesure l'erreur de l'excentricité, M. Mohs suit le mode d'opération qu'a proposé M. Weisbach (voyez plus haut). Il établit son goniomètre au milieu d'une chambre, et choisit quatre mires en forme de croix, composées chacune d'un fil vertical et d'un fil horizontal, également distantes du cristal et à la même hauteur que lui, savoir : deux (*m* et *m'*) sur deux fenêtres situées d'un même côté, et les deux autres (*p* et *p'*) sur le mur opposé. Puis, tournant le dos aux deux fenêtres, il cherche à faire coïncider, dans la première mesure, l'image de la croix *m* avec la croix *p*, et dans la seconde mesure, celle de la croix *m'* avec la croix *p'*. Ce goniomètre horizontal nous paraît moins simple et moins commode dans la pratique que le goniomètre vertical; et il n'offre en réalité aucun avantage qu'on ne puisse également retrouver dans l'ancien goniomètre, en dirigeant l'opération d'une manière convenable. On peut donc adopter indifféremment l'un ou l'autre, ou même les employer concurremment, lorsqu'il s'agira d'avoir une mesure avec une très-grande précision : car dans ce cas il est utile, non-seulement de multiplier les observations, mais encore d'en varier le plus possible les circonstances.

§ 3. *Goniomètre de Babinet.*

Une autre modification plus importante a été proposée récemment par M. Babinet dans la construction des goniomètres à réflexion. Tous les goniomètres de ce genre sont fondés sur les mêmes principes d'optique et de géométrie : ils ne diffèrent entre eux que par la nature et la disposition des objets qui servent de mire. Dans celui de Wollaston, les mires sont des lignes horizontales situées à une grande distance de l'instrument, et la première chose à faire, quand on veut mesurer un angle, c'est de régler la position de l'instrument sur celle des mires. Dans le goniomètre de M. Babinet, représenté figure 29, l'instrument porte ses mires avec lui; le plan du cercle peut avoir une position quelconque, mais il faut préalablement régler la direction de la *mire principale* sur celle du cercle. Cette mire se compose de deux fils croisés à angles droits au foyer de l'oculaire d'un collimateur ou lunette fixe *a;* et il faut commencer par placer

l'un des fils parallèlement au plan du cercle. Que celui-ci, par exemple, soit supposé horizontal, l'un des fils de la mire devra être pareillement horizontal, et par conséquent le second sera vertical, comme l'arête du cristal à mesurer.

Comment se fait-il que l'on puisse prendre pour mires, des objets aussi rapprochés du cristal que le sont les fils de la lunette *a*, tandis que le grand éloignement des mires semble être une condition, non-seulement favorable, mais encore indispensable pour assurer l'exactitude de la mesure? La lunette fixe *a* est accommodée pour voir nettement à de grandes distances; et au-devant de son oculaire, à une distance beaucoup plus grande que sa distance focale, est placée la source de la lumière qui doit éclairer les deux fils : ce sera, si l'on veut, la lumière des nuées, ou celle d'une lampe suffisamment éloignée. Les choses étant ainsi disposées, toute la lumière, dont la mire est éclairée, doit sortir de la lunette par l'objectif sous la forme d'un faisceau de rayons sensiblement parallèles : car, la lunette étant arrangée pour voir à une grande distance, les fils se trouvent placés aussi à très-peu près au foyer principal de l'objectif. Or, quand l'œil reçoit un faisceau de rayons *parallèles*, que le point lumineux, qui le donne, soit très-près, ou à une distance très-grande, le résultat de la vision est absolument le même dans les deux cas. Ainsi, par cette ingénieuse disposition, un point de mire très-rapproché (tel que le point d'intersection des deux fils, pris pour repère) produira le même effet que s'il était réellement placé à une distance infinie. L'instrument est pourvu d'une seconde lunette *b*, ayant, comme la première, deux fils croisés au foyer de son oculaire, et étant pareillement accommodée pour voir à grande distance; mais au lieu d'être fixée sur le limbe, elle est mobile, son support pouvant se déplacer et parcourir toute la circonférence du cercle.

Dans le goniomètre de Wollaston, on juge que les deux faces de l'angle à mesurer sont perpendiculaires au plan du cercle, lorsque chacune d'elles rend parallèles les images de deux mires rectilignes. C'est aussi à l'aide d'une observation de parallélisme que se vérifie la perpendicularité des faces du cristal dans le goniomètre de M. Babinet. Mais ici l'image vue *directement* n'est qu'un point (l'intersection des fils de la lunette mobile *b*); l'image vue par réflexion sur le cristal est une ligne (c'est l'image du fil de la lunette *a*, que l'on a dû rendre parallèle au limbe, ainsi qu'il a été dit). Appelons ce fil, le *fil horizontal*, pour

simplifier le discours. Eh bien ! pour que la face sur laquelle on vise soit perpendiculaire au limbe, il faut que l'image du point de repère paraisse se déplacer parallèlement au fil horizontal, lorsqu'avec la main on fait mouvoir la lunette mobile vers la droite ou vers la gauche, sans que l'œil abandonne l'oculaire.

Pour opérer avec cet instrument, il faut, comme nous l'avons dit, disposer les lunettes de manière à ce que l'on puisse voir distinctement les objets éloignés avec chacune d'elles, et que, la lunette mobile *b* étant amenée vis-à-vis la lunette fixe *a*, on voie nettement, au moyen de la première, les deux fils de la seconde. Pour y parvenir, on pousse un peu, si cela est nécessaire, les tubes qui portent les oculaires. Les deux lunettes étant ainsi placées vis-à-vis l'une de l'autre, comme le représente la *figure 30*, on cherche d'abord à rendre un des fils de *a* parallèle au cercle. Pour cela, on tourne un peu l'oculaire de la lunette mobile, jusqu'à ce que ses fils paraissent obliques à l'égard de ceux de la lunette fixe, puis on tourne doucement l'oculaire de la lunette fixe, jusqu'à ce que le point de repère (intersection des fils de *b*) se déplace parallèlement à l'un des fils de *a*, comme dans l'observation déjà mentionnée.

Cela fait, on passe à l'ajustement du cristal sur le support central. Ce support se compose d'une plaque circulaire que porte une alidade mobile. Celle-ci, dans son mouvement, entraîne forcément avec elle la plaque, et par conséquent aussi le cristal qui y adhère; mais la plaque peut tourner aussi sur elle-même, indépendamment de l'alidade qui reste alors immobile.

Le cristal étant fixé avec de la cire sur la plaque circulaire, et l'une des faces de l'angle ayant été dirigée de manière à ce qu'elle soit sensiblement perpendiculaire au limbe, on vérifiera si cette condition est remplie, par l'observation du parallélisme dont nous avons parlé; cette observation étant faite cette fois par le moyen de la réflexion sur la face dont il s'agit, ce qui exige que les lunettes soient disposées à peu près comme l'indique la figure 29. Si la condition n'a pas lieu, on presse un peu avec le doigt le cristal dans un sens ou dans l'autre, jusqu'à ce qu'on obtienne rigoureusement le parallélisme désiré. Après avoir ajusté une première face, on ajuste la seconde de la même manière, en l'amenant devant la lunette *b* par un mouvement imprimé à la plaque circulaire, et en ayant soin de s'assurer ensuite si la première face n'a point perdu sa verticalité.

Quant à la mesure de l'angle, elle s'obtient comme dans tous

les goniomètres, au moyen d'une rotation du cristal, opérée, cette fois, à l'aide de l'alidade, depuis une position donnée de la première face, jusqu'à ce que la seconde ait pris une position semblable. Le phénomène de lumière, qui sert à déterminer les positions initiale et finale, consiste dans la coïncidence du point de repère (le point de section des fils de la lunette *b*) avec le fil *vertical* de la lunette *a*, c'est-à-dire avec celui des deux fils qui est perpendiculaire au limbe. Il est toujours sous-entendu que la direction du plan du cercle peut être quelconque; aussi l'instrument est-il tenu à la main à l'aide d'une poignée, pendant l'opération, comme le montre la figure 29.

Cet instrument a des avantages qui le rendent précieux pour les naturalistes, et surtout pour les physiciens. Il est commode, en ce qu'il se suffit pleinement à lui-même, et peut servir en tous lieux, comme à toute heure et en toute saison. C'est le plus simple de tous les goniomètres pour les opérations du soir; et nous verrons plus loin, lorsque nous traiterons des propriétés physiques des corps transparents, qu'il donne aisément la *déviation minimum* d'un prisme réfringent, en même temps que l'angle de ce prisme, et par conséquent peut servir à connaître l'indice de réfraction de la substance dont le prisme est formé. — Ce goniomètre offre cependant un inconvénient, qu'il partage, du reste, avec tous ceux qui sont pourvus de lunettes : c'est que l'emploi des verres grossissants diminue la netteté des images et rend leur perception difficile, et presque impossible dans les cas où les cristaux sont très-petits et leurs faces peu miroitantes. Il en résulte qu'il ne peut dispenser le minéralogiste de recourir souvent au goniomètre de Wollaston, qui, ayant été disposé par son auteur précisément pour servir à la mesure de cristaux presque microscopiques, et pour répondre à toutes les nécessités des observations minéralogiques, nous paraît encore être le seul qui soit applicable à la généralité des cas auxquels elles donnent lieu.

§ 4. *Combinaison des résultats fournis par les mesures goniométriques.*

Lorsqu'on a plusieurs résultats moyens fournis par des observations de divers genres, comme celles que l'on obtiendrait avec les trois goniomètres dont nous venons de parler, ou bien avec le même instrument disposé successivement de différentes ma-

nières, ou employé à mesurer des angles différents, mais qui dépendent les uns des autres, on ne peut plus se borner à prendre une moyenne arithmétique entre ces résultats, comme on le fait pour les séries de répétitions que l'on obtient avec le même instrument et en opérant toujours de la même manière; car par là on ne tiendrait pas compte du degré plus ou moins grand d'exactitude des divers genres d'observations. Le calcul des probabilités nous apprend que, dans ce cas, on doit faire concourir au résultat final chaque résultat moyen particulier, proportionnellement à une certaine quantité, qu'on appelle le *poids* du résultat, et qui mesure en quelque sorte le degré de confiance que l'on peut avoir en lui. On multipliera donc chaque résultat moyen par son poids, et l'on divisera la somme des produits ainsi obtenus par la somme des poids. Quant à la règle que l'on suit, pour avoir le poids du résultat d'une série particulière d'observations, elle consiste à prendre la différence entre chaque observation simple et le résultat moyen, à faire la somme des carrés de ces différences, et à diviser par le double de cette somme le carré du nombre des observations (1).

§ 5. *Principe de la constance des angles.*

Nous venons de décrire les instruments à l'aide desquels nous pourrons facilement constater la réalité d'un principe, dont la découverte est due à un savant minéralogiste français, Romé de l'Isle, et sur lequel s'appuie toute la science cristallographique. Ce principe consiste en ce que les angles sont constants dans tous les cristaux de la même espèce, qui se rapportent à la même variété de forme. Prenons pour exemple le minéral appelé *quarz-hyalin*, ou vulgairement cristal de roche. La forme la plus ordinaire de ses cristaux est celle d'un prisme à six pans, surmonté de pyramides (fig. 66, pl. VII). Dans toutes les contrées du globe on rencontre de semblables cristaux, et toujours ils offrent (sauf les cas d'exception dont nous parlerons tout à l'heure) une parfaite identité, non dans l'étendue de leurs faces correspondantes (car cette étendue relative varie beaucoup, ainsi que nous l'avons

(1) Voyez, pour plus de détails sur ce sujet, les ouvrages de M. Kupffer, cités précédemment. Ce physicien a calculé une table au moyen de laquelle, connaissant le poids d'un résultat, on peut savoir la probabilité que l'erreur de ce résultat est comprise entre les limites d'une minute ou d'une demi-minute, en plus et en moins.

déjà remarqué), mais dans les inclinaisons mutuelles de leurs faces. Dans tous les cristaux pyramidés de quarz, l'inclinaison d'une face de pyramide sur le pan adjacent est de 141° 47'. D'autres minéraux présentent des formes analogues : l'apatite (ou phosphate de chaux) est dans ce cas. Dans les cristaux d'apatite, l'angle correspondant à celui que nous venons de considérer est encore constant, mais à cause du changement d'espèce, il a une autre valeur, qui est 130° 10'. Ainsi, en passant d'une espèce minérale à une autre, une forme d'un certain genre ne conserve plus en général les mêmes angles ; il n'en est pas de même lorsqu'on l'observe dans plusieurs individus de la même espèce : dans ce cas, les angles sont invariables.

Ce résultat d'observation est important à plusieurs égards. D'abord, il donne une grande valeur à la mesure des angles des cristaux. Si, lorsqu'on passe d'un cristal à un autre de la même espèce, on rencontrait toujours des variations dans la grandeur des angles, le caractère fourni par le goniomètre serait tout aussi insignifiant que l'est celui de la forme d'un minéral, lorsqu'elle devient irrégulière ; mais il n'en est point ainsi. Chaque forme régulière est une variété fixe qui se répète dans une multitude d'individus. A chaque cristal que l'on mesure répondent des milliers d'autres cristaux, qui existent répandus dans les diverses parties du globe et qui en sont une exacte copie.

Ce résultat est précieux sous un autre rapport, en ce qu'il annonce que les formes cristallines ne sont point accidentelles, mais qu'elles sont déterminées par des lois générales que nous aurons à rechercher ; il nous montre qu'elles ne dépendent pas uniquement des circonstances locales et variables au milieu desquelles la cristallisation s'opère, mais qu'elles dépendent aussi de la nature propre du corps qui cristallise. C'est ce que l'on verra bientôt confirmé par les faits que nous devons exposer.

§ 6. *Exceptions au principe de Romé de l'Isle. — Influence de la température et des mélanges isomorphiques sur la valeur des angles des cristaux.*

En insistant, comme nous venons de le faire, sur la constance des angles des cristaux, nous devons prévenir que ce principe n'est rigoureusement vrai que pour ceux de composition identique et de même température. M. Mitscherlich a montré le premier que les angles pouvaient varier dans les cristaux, par suite

de la dilatation inégale qu'ils éprouvent dans le sens de leurs différents axes, lorsqu'on vient à les chauffer fortement. Si l'on suppose, par exemple, qu'un rhomboèdre (1) de calcaire spathique, représenté fig. 69, pl. VII, dont l'angle dièdre au sommet est de 105° 4' à la température de 10° centigrades, soit porté à la température de 110°, il éprouvera une dilatation dans le sens de son axe vertical (celui qui aboutit aux deux angles trièdres réguliers), et se contractera, au contraire, dans les directions horizontales; un grand nombre d'observations faites par M. Mitscherlich, et dont ce chimiste a pris la moyenne, lui a prouvé que, pour cette différence de 100° en température, l'angle dièdre obtus diminuait de 8 minutes et demie. On voit que les variations occasionnées par un changement de température suivent une marche assez peu rapide, pour qu'elles paraissent tout-à-fait insensibles aux températures ordinaires. Ainsi, sauf les cas où l'on aurait besoin de connaître les angles d'un cristal avec toute la rigueur possible, pour des recherches délicates de physique, on peut, sans inconvénient, négliger l'influence de la cause perturbatrice dont nous venons de nous occuper (2).

Il n'en est pas de même des mélanges de molécules de diverse nature, qui peuvent faire varier la composition des cristaux : leur effet est beaucoup plus marqué. Mais il importe de distinguer ici deux sortes de mélanges très-différents, et dont l'influence sur la cristallisation des corps est loin d'être la même.

Il existe des cristaux dont la masse est souillée intérieurement de particules étrangères, mais celles-ci ne font point partie intégrante des couches du cristal, elles ne sont qu'interposées dans les interstices qui les séparent, de telle sorte que si on les enlève par la pensée, le cristal n'éprouve aucun déchet et subsiste tout entier. Souvent il est arrivé qu'un minéral s'est consolidé au mi-

(1) Un rhomboèdre est un parallélipipède obliquangle terminé par six rhombes égaux et qui a deux angles solides réguliers. Dans celui que nous citons ici, l'inclinaison des faces vers chacun de ces angles, appelés les sommets du rhomboèdre, est de 105° 5', à la température ordinaire.

(2) Ce changement, opéré par une élévation de température sur les inclinaisons des faces et des plans de clivage des cristaux, confirme ce que nous avons dit, p. 30, de la variabilité des polyèdres moléculaires. Puisque les axes des molécules cristallines sont toujours rangés parallèlement aux lignes principales du réseau cristallin, il faut bien, si celles-ci subissent une modification dans leurs inclinaisons respectives, qu'il en soit de même aussi des axes moléculaires, ce qui implique une légère déformation de la molécule elle-même.

lieu d'un dépôt liquide, pâteux ou pulvérulent : dans ce cas, il a presque toujours entraîné et retenu mécaniquement, entre ses propres molécules, quelques parties de cette matière, qui, disséminées plus ou moins irrégulièrement dans sa masse, n'ont altéré en rien sa structure cristalline à laquelle elles sont tout-à-fait étrangères. Beudant a donné avec raison à cette espèce de mélange le nom de *mélange grossier* ou *mécanique*. Il a lieu en quelque sorte au hasard entre des molécules de substances qui n'ont aucune analogie de composition chimique et de forme cristalline. Tel est le mélange de particules siliceuses que l'on remarque quelquefois dans certains cristaux rhomboédriques de calcaire, qui se sont formés au milieu des sables de la forêt de Fontainebleau, et qui, pour cette raison, avaient reçu anciennement le nom fort impropre de *grès rhomboïdal* de Fontainebleau. Cette espèce de mélange ne paraît pas avoir une influence sensible sur la valeur des angles du cristal ; il n'a d'autre effet que de communiquer une couleur accidentelle et non uniforme à la substance principale, qui a cristallisé malgré sa présence, et d'altérer plus ou moins son éclat et sa transparence.

Mais il est une autre espèce de mélange, qu'on pourrait appeler *cristallin*, parce qu'il a lieu dans le cristal même, et non plus en dehors de sa substance propre, comme dans le cas qui précède. La découverte de l'isomorphisme, que l'on doit à M. Mitscherlich, et qui est bien assurément le principe le plus important dont la science des minéraux se soit enrichie depuis Haüy, nous a fait voir qu'il existe des *cristallisations mixtes*, formées de molécules de différente nature : ces molécules, qui ont fait partie d'une même dissolution, ont cristallisé ensemble, c'est-à-dire qu'elles se sont déposées les unes à côté des autres aussi régulièrement qu'elles l'eussent fait, si elles avaient été identiques, et ont par conséquent concouru à la formation d'un seul et même cristal.

On présume bien qu'un mélange de cette sorte ne peut se faire indifféremment entre des molécules de nature quelconque ; aussi l'observation prouve-t-elle qu'il n'a lieu généralement qu'entre des molécules qui ont une certaine analogie de forme et de composition chimique. Ordinairement on ne l'observe qu'entre les molécules des substances dites *isomorphes*, molécules qui ont le même type de composition chimique, et sans doute aussi la même forme géométrique. Il résulte de cette cir-

constance particulière, que sans être chimiquement identiques, elles sont physiquement équivalentes, ou du moins se montrent telles dans l'acte de la cristallisation, qui peut employer ces éléments indifféremment l'un pour l'autre. Des molécules isomorphes sont donc des molécules qui exercent, les unes à l'égard des autres, une sorte de vicariat; qui peuvent se remplacer à tour de rôle, et donner lieu ainsi à de fréquentes et de nombreuses substitutions, sans que la régularité et la symétrie du cristal en soient affectées.

Ces mélanges, qui s'opèrent, comme nous l'avons dit, dans le cristal même, étaient inconnus au fondateur de la cristallographie française, l'abbé Haüy : cet illustre minéralogiste ne pensait pas qu'un cristal régulier pût être constitué autrement que par des molécules similaires et complètement identiques. C'est la découverte des faits relatifs à l'isomorphie, qui est venue changer nos idées sur ce point, et nous sommes forcés d'admettre aujourd'hui que des molécules différentes, mais de forme et de structure semblables, peuvent avoir contribué de concert à l'édification d'un seul et même cristal. Les mélanges cristallins de molécules appartenant à des substances isomorphes font partie de cette classe de mélanges, que Beudant a appelé *mélanges chimiques*, parce qu'ils ont eu lieu par voie de dissolution chimique, et que la substance accidentelle paraît être comme dissoute à l'état moléculaire dans la substance principale. Les mélanges chimiques se font en proportions indéfinies : la couleur du corps varie suivant la nature de celles des substances mélangées, et suivant leur quantité relative. Mais ce qui caractérise ce genre de mélanges, et le distingue des mélanges purement mécaniques, c'est que, lorsqu'il a lieu entre une substance qui par elle-même est limpide et incolore, et des substances colorées, celles-ci n'altèrent en général ni l'éclat, ni la transparence de la première, comme on le voit dans la plupart des pierres précieuses, dont les couleurs sont dues à des mélanges chimiques.

Bien que nous devions traiter ailleurs du principe de l'isomorphisme avec tout le développement que mérite son importance, nous ne pouvons nous dispenser d'en donner ici une notion abrégée, mais suffisante pour l'intelligence des faits que nous avons à exposer. L'isomorphisme consiste en ce que des corps de nature chimique différente peuvent affecter des formes analogues, et sinon identiques, du moins très-voisines par la va-

leur de leurs angles, lorsqu'ils sont composés de nombres égaux d'atomes semblablement disposés. Ces corps ont ainsi une composition atomique, non identique, mais analogue, et susceptible d'être représentée par une même formule générale : ils ont des types moléculaires semblables. Cette analogie de composition, avec différence de nature dans les éléments, entraîne une très-grande ressemblance dans les formes cristallines, qui sont du même genre et ne diffèrent que fort peu par les angles. M. Mitscherlich a donné le nom de corps *isomorphes* à ces combinaisons analogues de différents éléments, qui prennent en cristallisant la même forme, ou du moins des formes très-rapprochées. Ces substances sont le plus ordinairement des sels, composés d'un acide commun et de bases différentes, mais de manière que dans chacun d'eux il y a le même nombre de molécules de base et d'acide. En voici un exemple tiré du groupe des carbonates naturels.

Il existe dans la nature plusieurs carbonates formés d'un atome d'acide carbonique ($\ddot{C}$), et d'un atome de base ($\dot{r}$) à un seul atome d'oxygène (1). Ils ont, comme on le voit, même composition atomique $\ddot{C}\dot{r}$, et ne diffèrent que par la nature chimique du radical *r*. Tous ces carbonates cristallisent en rhomboèdres, semblables à celui du spath d'Islande, ou carbonate de chaux ordinaire (fig. 69). Il suffit, pour déterminer complètement une pareille forme, de faire connaître un seul de ses angles dièdres, par exemple celui que l'on peut mesurer aux arêtes culminantes. Les carbonates, que nous citerons ici, sont : le calcaire, ou carbonate de chaux ; la giobertite, ou carbonate de magnésie ; la sidérose, ou carbonate de fer ; la diallogite, ou carbonate de manganèse ; et la smithsonite, ou carbonate de zinc.

	Formules atom.	Angle aux arêtes culmin.
Calcaire.	$\ddot{C}\dot{C}a$	105° 5'.
Giobertite.	$\ddot{C}\dot{M}g$. . . .	107° 25'.
Sidérose.	$\ddot{C}\dot{F}e$.	107° 6'.
Diallogite.	$\ddot{C}\dot{M}n$. . . .	106° 51'.
Calamine (Smithsonite B[t].).	$\ddot{C}\dot{Z}n$.	107° 40'.

(1) Voyez, plus loin, l'article où nous parlons des notions chimiques et des formules atomiques. La notation que nous suivons ici est celle qui a été proposée par M. Berzélius, et dans laquelle de simples points représentent les atomes d'oxygène.

Non-seulement les composés de ce genre ont la propriété de cristalliser à très-peu près de la même manière, lorsqu'ils sont isolés; mais encore, ils en possèdent une autre très-remarquable, celle de cristalliser ensemble, lorsque leurs molécules existent pêle-mêle dans le même dissolvant : de cristalliser en même temps, non pas en formant des cristaux séparés et seulement joints par juxta-position, mais en se réunissant et se mêlant en toutes sortes de proportions dans un cristal unique dont ils fournissent les matériaux en commun. Telle est l'origine de ces cristaux mixtes dont nous avons parlé plus haut.

§ 7. *Loi de Beudant.*

Dans tous les cas de ce genre, l'angle du cristal mixte est différent de ceux des cristaux simples, que donneraient les molécules de chaque composé particulier s'il cristallisait séparément : il a une valeur intermédiaire (1), et d'après une loi hypothétique, formulée par Beudant, cette valeur serait une moyenne entre les angles propres à chaque substance, prise proportionnellement à la quantité de chacune d'elles.

Supposons le cas de deux carbonates isomorphes; soit a l'angle du premier, b celui du second, et x celui du carbonate mélangé. Si le rapport des nombres d'atomes des deux substances, qui entrent dans un poids quelconque du mixte, est celui de m à n, on aura, d'après la loi de Beudant,

$$x=\frac{ma+nb}{m+n}$$

Cette formule ne repose encore que sur un petit nombre d'observations faites par Beudant sur les mélanges de carbonates et de quelques autres sels. Il est possible que cette loi ne soit qu'approximative; on peut espérer cependant que de nouvelles observations viendront la confirmer; car sa simplicité seule la rend assez probable. Aussi a-t-elle déjà reçu plusieurs vérifications *a posteriori*. Nous nous bornerons à citer les deux suivantes.

Il existe dans la nature un carbonate double de chaux et de magnésie, appelé *dolomie*, et qui, lorsqu'il est cristallisé et

(1) Nouvelle preuve encore des variations que peuvent subir les formes des molécules : car, dans le cas dont il s'agit, celles de nature différente s'influencent et se modifient réciproquement, de manière à prendre toutes en même temps une forme moyenne.

parfaitement pur, est composé d'atomes égaux de carbonate calcaire et de carbonate magnésien, à l'état de mélange cristallisé. Ainsi, dans ce cas, $m=n=1$. a, ou l'angle du rhomboèdre du calcaire est égal à 105°5'; b, ou l'angle correspondant de la giobertite ou magnésie carbonatée, est 107° 25'. Par l'application de la formule on a donc

$$x=\frac{105^\circ\ 5' + 107^\circ\ 25'}{2}=106^\circ\ 15'.$$

C'est précisément là la valeur, que les mesures directes, prises au goniomètre à réflexion par Wollaston, ont donnée pour le rhomboèdre de la dolomie.

On connait un autre carbonate double, auquel les minéralogistes allemands ont donné le nom de *mesitinspath*, et qui est au carbonate de fer ce que la dolomie est au carbonate de chaux : car, d'après l'analyse que M. Stromeyer en a faite, il est composé d'un atome de carbonate de fer et d'un atome de carbonate de magnésie. Ici, $a=107^\circ\ 1'$, $b=107^\circ\ 25'$, et $m=n=1$. On a donc, pour l'angle du rhomboèdre de mesitinspath

$$x=\frac{107^\circ 1' + 107^\circ\ 25'}{2}=107^\circ\ 12'\tfrac{1}{2}$$

L'observation directe avait donné à M. Breithaupt 107° 14'.

La formule ci-dessus peut servir à déterminer le rapport des quantités atomiques de deux substances mélangées, sans qu'on soit obligé d'analyser le cristal mixte, lorsque l'on connaît l'angle de ce cristal, et celui de chaque substance particulière. Il suffit, pour cela, de renverser cette formule, en en tirant la valeur de

$$\frac{m}{n}. \text{ On obtient ainsi } \frac{m}{n}=\frac{x-b}{a-x}.$$

Ainsi, pour la dolomie, si l'on ignore le rapport des deux composants, et qu'on connaisse seulement leur nature, on aura pour calculer $\frac{m}{n}$, sachant que $a=105^\circ 5$, $b=107^\circ 25'$, et $x=106^\circ 15'$, l'équation $\frac{m}{n}=\frac{106^\circ\ 15' - 107^\circ\ 25'}{105^\circ\ 5' - 106^\circ\ 15'}$,
ou bien, en changeant les signes des numérateur et dénominateur du second membre, et faisant les soustractions,

$$\frac{m}{n}=\frac{1^\circ\ 10'}{1^\circ\ 10'}=1.$$

On voit donc qu'à l'aide d'une mesure d'angle, il est possible, dans certains cas, de calculer les proportions d'un composé, et par conséquent d'en trouver l'analyse, comme dans d'autres parties de la physique, dans l'étude des mélanges de gaz, par exemple, on est parvenu à établir de semblables calculs analytiques, en s'appuyant sur la considération soit des densités, soit des puissances réfractives.

La loi de Beudant, si elle est exacte, est sans doute applicable à tous les cristaux dont la détermination ne dépend que d'un seul angle, et par conséquent aux octaèdres à base carrée. Quant aux cristaux, d'une symétrie moins parfaite, comme les octaèdres à base rhombe ou parallélogrammique, dont la détermination complète dépend de deux ou d'un plus grand nombre d'angles, nul doute qu'il n'y ait une loi analogue et plus générale qui leur convienne; mais cette généralisation de la loi de Beudant est encore à trouver.

CHAPITRE III.

DES LOIS AUXQUELLES SONT SOUMISES LES FORMES CRISTALLINES.

§ 1. *Principe de la variation des formes dans la même espèce.*

Passons maintenant à l'exposition des faits principaux, qui concernent l'étude des formes cristallines. Un résultat d'observation, connu depuis longtemps, c'est que dans la même espèce minérale, les formes cristallines peuvent *varier à l'infini*.

On avait déjà remarqué que la nature des formes pouvait servir à établir une différence générale entre les corps inorganiques et les corps organiques. En effet, dans ceux-ci les formes sont généralement arrondies; dans ceux-là, au contraire, elles sont angulaires, et terminées par des droites et des plans, de manière que la ligne droite paraît caractériser les minéraux, et la ligne courbe, les animaux et les plantes.

La diversité des formes, dont une même substance est susceptible, établit un nouveau contraste entre les minéraux et les êtres organiques. Dans les végétaux, par exemple, les divers in-

dividus d'une même espèce portent évidemment l'empreinte d'un modèle commun, sur lequel ils semblent avoir été travaillés : au milieu de quelques variations légères et accidentelles, le type primitif subsiste toujours. Le même minéral, au contraire, se présente souvent sous une multitude de formes cristallines différentes, toutes également régulières, et dont la plupart paraissent, au premier abord, n'avoir aucun trait de ressemblance entre elles. Par exemple, si un minéral offre sous l'une quelconque des formes représentées par les figures 1 à 14, planche IV, il pourra se rencontrer sous toutes les autres. Le calcaire spathique est souvent cristallisé sous la forme d'un rhomboèdre (fig. 69), mais on l'observe aussi sous la forme d'un scalénoèdre (fig. 74), sous celle d'un prisme hexagonal régulier (fig. 67), et sous une multitude d'autres. Il est des espèces dans lesquelles le nombre des formes cristallines, fournies par l'observation, s'élève à plusieurs centaines; et si l'on avait égard, non-seulement aux formes observées jusqu'à ce moment, mais encore à toutes celles qui sont reconnues possibles en théorie, c'est par milliers et par millions qu'il faudrait les compter. Mais il en est ici des formes cristallines, comme des combinaisons dans la chimie minérale. La nature, qui a réglé par des lois les unes et les autres, s'est encore imposé de nouvelles restrictions, en ne réalisant parmi les résultats de ces lois, qui sont théoriquement possibles, que ceux qui satisfont à la condition d'être extrêmement simples. Cependant, tout en restant dans les limites de la plus grande simplicité, on peut dire encore que le nombre des formes réellement observables dans une seule espèce minérale, est de plusieurs centaines. A quoi tient cette prodigieuse multiplicité de formes? à des causes que nous allons exposer dans un instant.

Mais auparavant, nous devons prévenir une objection que l'on pourrait tirer de cette circonstance, contre l'importance de la forme en minéralogie. Si, au lieu de subir une pareille variation, la forme cristalline se montrait constante dans tous les minéraux de même espèce, et ne changeait que d'une espèce à une autre, il est clair que, de l'observation de cette forme, on pourrait tirer un caractère véritablement *spécifique*, comme on fait, dans les règnes organiques, de la forme extérieure des plantes ou des animaux. En zoologie, par exemple, tous les individus d'une même espèce se ressemblent tellement par leur forme, que, qui a vu l'un de ces individus, peut se représenter

l'espèce tout entière. En minéralogie, il ne paraît pas qu'il puisse en être de même, puisque chaque espèce, au lieu d'offrir une forme unique, nous présente une multitude de formes, en apparence fort différentes. Et cependant, nous verrons bientôt que l'observation de chaque forme individuelle a le même degré d'importance que si elle était invariable, et par conséquent unique dans l'espèce. C'est que ces formes, si dissemblables, au premier abord, laissent apercevoir à un œil attentif une si parfaite analogie entre elles, et des liens si étroits, que l'on en vient bientôt à ne voir en elles que de légères modifications d'un même type, et à les confondre dans l'esprit en un seul tout, que chacune de ces formes rappelle et représente à son tour. Ainsi donc, malgré les métamorphoses sans nombre qu'elle subit, la forme régulière d'un minéral semble rester toujours la même, et l'on retrouve ici le cachet ordinaire des œuvres de la nature, l'*unité* dans la variété.

Nous avons dit que la multiplicité des formes cristallines dans la même substance minérale, tenait à plusieurs causes que nous ferions bientôt connaître. Elle provient : 1° de ce que, dans le même minéral, il y a un nombre plus ou moins considérable de formes simples d'*espèces différentes*, qui ne se distinguent que par la valeur particulière de leurs angles, et se rapportent à un même *genre*, ce qui fait que ces formes spéciales ont reçu une même dénomination générique. Ainsi, dans le calcaire spathique, il y a plusieurs espèces de rhomboèdres (1), plusieurs espèces de scalénoèdres, etc.

2° De ce qu'il y a ensuite plusieurs *genres* distincts de formes simples, plusieurs genres de formes, qui diffèrent par la figure, le nombre ou l'assortiment des faces qui les composent; par exemple, dans le calcaire : le genre *rhomboèdre*, le genre *scalénoèdre*, le genre *prisme hexaèdre*, etc. C'est, comme on le voit, le nom seul qui distingue le *genre* d'une forme, tandis que son *espèce* se détermine par la valeur particulière de ses angles.

(1) Dans le minéral que nous citons, on connaît un premier rhomboèdre, dont l'angle dièdre, pris vers les sommets, est de 105° 5'; un second dont l'angle est de 78° 51'; un 3e dont l'angle est de 134° 57'; un 4e dont l'angle est de 65° 50', etc. L'existence des formes de même genre, qui présentent des valeurs d'angles différentes, n'est point contradictoire avec le principe de la constance des angles dans chaque forme spéciale. Chacun de ces rhomboèdres est une variété fixe, et la différence qui existe entre leurs angles est constante. Quelque voisins que soient deux de ces rhomboèdres, on va de l'un à l'autre par un saut brusque, et l'on n'observe pas les formes intermédiaires qui rendraient le passage insensible.

3° Enfin, de ce que les formes simples, d'espèces et de genres différents, peuvent se combiner deux à deux, trois à trois, quatre à quatre, etc., pour produire par leur réunion en un tout des *formes composées*, que l'on appelle, en cristallographie, des *combinaisons*. C'est un résultat d'observation général et bien constant, que quand deux formes différentes ont été observées séparément dans une espèce minérale, on peut s'attendre à les trouver *combinées* ensemble en une troisième forme, qui offrira la réunion des faces des deux premières, les faces de chacune des formes composantes conservant les mêmes directions et la même disposition relative que si cette forme existait seule. Il est de la plus haute importance de bien remarquer comment s'opèrent ces combinaisons de deux formes en une seule, toute la cristallographie étant fondée sur ce genre d'observation.

§ 2. *Des combinaisons. — De la manière dont se fait la combinaison de deux formes simples.*

Quand une forme cristalline se présente combinée avec une autre, les faces de la première apparaissent toujours comme le résultat de sections qui auraient été pratiquées, conformément à la symétrie, sur les angles et sur les arêtes solides de la seconde forme, supposée primitivement complète. Celle-ci semble donc avoir été comme tronquée symétriquement en divers sens par des plans coupants que représentent les faces de l'autre. D'ordinaire, l'une des formes est dominante : c'est celle qui paraît avoir subi des sections sur ses parties extrêmes. Les faces de l'autre ont généralement peu d'étendue : on les appelle *facettes de troncature*, ou simplement *troncatures* : c'est le nom que leur a donné Romé de l'Isle. Il est bien entendu que cette expression doit être prise dans un sens figuré. La nature, quand elle veut opérer une combinaison de deux formes, ne commence pas par édifier un cristal complet de la première, pour en retrancher ensuite des portions sur les angles ou les arêtes; elle produit ordinairement d'un seul jet la forme complexe : mais le résultat de son opération est exactement le même que si elle avait procédé par voie de troncature.

On peut considérer d'une autre manière ces petites facettes additionnelles, qui paraissent avoir remplacé soit les angles, soit les arêtes d'une forme dominante. On peut ne voir en elles que de petites facettes surnuméraires, qui ne font que modifier

légèrement la première forme, sans dénaturer son type, sans altérer sa physionomie essentielle, et seulement pour produire une simple variété de cette forme, pour en diversifier l'aspect. De là le nom de *facettes modifiantes*, que l'on a donné aussi aux plans de troncature, et celui de *modification*, par lequel on désigne quelquefois l'ensemble des facettes, qui remplacent une arête ou un angle solide.

§ 3. *Passage graduel d'une forme à une autre.*

La considération de ces formes modifiées, de ces combinaisons binaires d'une première forme avec les faces d'une seconde, peut servir à mettre en évidence une sorte de passage graduel, qui existe réellement dans la nature, d'une forme simple d'un minéral à une autre forme simple du même minéral. Ce passage est indiqué par les cristaux eux-mêmes; il ressort de leur rapprochement et de leur distribution en une série convenablement ordonnée : c'est ce que nous allons essayer de faire comprendre.

Dans tous les minéraux qui présentent des cristaux de forme cubique, on trouve toujours associés, et pour ainsi dire en famille avec eux, des cristaux de forme toute différente, par exemple des octaèdres réguliers. Si l'on compare immédiatement, sans intermédiaires, le cube (fig. 33, pl. II) à l'octaèdre (fig. 37), on n'aperçoit pas ce que ces deux formes peuvent avoir de commun entre elles. Mais, entre le cube et l'octaèdre, il est possible d'intercaler d'autres formes qui établissent une gradation marquée, une sorte de passage du premier solide au second. Ces formes intermédiaires ou de passage sont des combinaisons binaires des deux formes extrêmes; elles font partie de la même famille, et se rencontrent avec elles parmi les cristaux naturels. Il suffit de les chercher dans les collections un peu nombreuses, et de les rassembler dans l'ordre que nous allons indiquer. Entre le cube (fig. 33) et l'octaèdre (fig. 37), concevons que l'on ait placé des formes analogues à celles qui sont représentées (fig. 34, 35 et 36). La première de ces formes (fig. 34) n'est que le cube (fig. 33) légèrement modifié par de petites facettes triangulaires, semblables à celles que l'on produirait en tronquant avec symétrie tous les angles de ce cube : elle porte encore l'empreinte cubique d'une manière trop visible, pour qu'on ne saisisse pas, au premier aspect, le rapport qu'ont entre elles ces

deux formes. La forme suivante (fig. 35) n'est encore que le même cube, tronqué de la même manière, mais assez profondément, pour que les faces du cube, qui, dans la forme précédente, étaient de figure octogone, se soient transformées en carrés. Dans la figure 36, les nouvelles faces ou les troncatures ont encore augmenté d'étendue aux dépens des faces primitives, qui se sont réduites à de plus petits carrés. Les figures 35 et 36 peuvent donc être considérées comme de simples modifications de la fig. 34, puisqu'elles offrent le même assortiment de faces, seulement avec des dimensions différentes. Mais la dernière forme se présente sous un autre aspect, et ses rapports avec l'octaèdre (fig. 37) sont manifestes : car elle est à cet octaèdre ce que la seconde forme (fig. 34) est à la première (fig. 33), c'est-à-dire, qu'elle n'est qu'un octaèdre incomplet ou légèrement tronqué sur les angles.

Cet exemple suffit pour montrer ce que l'on doit entendre par la combinaison de deux formes en une seule, par la modification et transformation progressive des formes d'un minéral, ou par le passage gradué de l'une de ces formes à une autre de genre différent. C'est à l'aide d'une série de combinaisons binaires, interposées entre deux formes extrêmes, que ce passage est rendu sensible; et celui-ci a toujours lieu de la même manière, par de petites facettes additionnelles, qui remplacent soit les angles, soit les arêtes de la première forme. Celle-ci nous apparaît alors, comme si elle était restée incomplète; ou comme si, ayant été produite d'abord à l'état complet, elle avait été ensuite tronquée par des plans coupants, assortis entre eux pour le nombre et les positions relatives, comme les faces de l'autre forme. Ces nouvelles facettes, qui, dans plusieurs combinaisons binaires, se montrent très-petites, augmentent peu à peu d'étendue dans la série des autres formes intermédiaires, jusqu'à devenir dominantes à leur tour, et faire disparaître à la fin tout ce qui restait des faces primitives. Alors, on obtient une forme d'un genre tout différent, et qui cependant peut, tout aussi bien que les formes précédentes, par lesquelles on a passé successivement, être envisagée comme une modification de la première. C'est ce passage, que la nature elle-même nous indique, entre une quelconque des formes d'un minéral et toutes les autres, qui nous rendra possible, et même facile, la connaissance exacte des *systèmes de formes*, qui ont été observées jusqu'à ce moment dans les nombreuses espèces du règne inorganique.

§ 4. *Des systèmes cristallins. — Systèmes cristallins généraux. — Séries cristallines particulières.*

Le problème qui a pour objet de déterminer le système des formes cristallines d'un minéral, peut s'entendre de deux manières, si l'on se reporte à la distinction que nous avons établie plus haut (page 73) entre les formes spéciales et les formes génériques. On peut se proposer de connaître toutes les formes *particulières* du minéral, en tenant compte de toutes celles qui ne différeraient que par la valeur de leurs angles ; ou bien, on peut se proposer seulement, et comme un acheminement vers la solution complète du problème, de déterminer les formes *génériques*, les formes de genres différents, en faisant abstraction des différences dans les angles, et ne prenant en considération que celles qui proviendraient du nombre ou de l'assortiment des faces.

Lorsqu'on se place au premier point de vue, et qu'on envisage, non pas seulement les différents genres de formes, mais toutes les formes particulières, et rigoureusement déterminées, on donne à l'ensemble complet de ces formes le nom de *système cristallin particulier*, ou de *série cristalline*. Ainsi, par exemple, la série cristalline du calcaire spathique se compose : 1° de plusieurs rhomboèdres, savoir : un de 105°5' ; un second, de 134°57' ; un troisième, de 65°50', etc. ; 2° de plusieurs scalénoèdres, pareillement distingués chacun par des valeurs d'angles particulières ; 3° de plusieurs *di-rhomboèdres*, également déterminés, etc., etc.

Si l'on ne veut considérer que les formes génériques, que les formes de noms différents, en n'ayant point égard aux différences spécifiques que les valeurs d'angles établissent entre elles, et en confondant par conséquent en une unité toutes celles qui portent une même dénomination générique ; dans ce cas, l'ensemble des formes qui peuvent coexister dans une même espèce minérale, est appelé *système cristallin général*, ou simplement *système cristallin*, en pressant ainsi cette dernière expression dans un sens déterminé, et réservant celle de *série cristalline* pour désigner la totalité des formes particulières d'un minéral.

A chacun de ces deux problèmes correspond une loi générale de la cristallisation, dont l'application bien entendue donne

§ 6. *Méthode des troncatures.*

Cette méthode consiste à *modifier* la forme prise pour point de départ, successivement sur chacune de ses différentes espèces d'angles et d'arêtes, par des facettes dont le nombre et la position se règlent sur la symétrie de cette forme et de ses parties, de telle sorte que la modification qui remplace une partie soit toujours iso-symétrique avec elle. Il suffit ensuite de prolonger par la pensée ces petites facettes additionnelles, jusqu'à ce qu'elles s'entrecoupent, pour avoir une des formes cherchées. Or, si l'on a soin de ne modifier chaque partie du solide fondamental que conformément à ce qu'exige sa symétrie, de répéter chaque modification sur toutes les parties qui sont homologues et identiques, et d'épuiser enfin toutes les combinaisons de facettes modifiantes, qui sont symétriquement possibles, et qui ne mènent qu'à des formes simples, on est sûr d'obtenir ainsi toutes les formes que l'on cherche, sans en laisser échapper une seule. Par l'usage fréquent de cette méthode, que nous appliquerons bientôt aux différents systèmes, on ne tarde pas à reconnaître ce que nous avons déjà eu l'occasion de faire remarquer, que toutes les formes d'un même système ont entre elles un air de famille; qu'elles ne sont que des modifications légères les unes des autres, et qu'il est facile de les lier dans l'esprit en un tout, que chacune d'elles peut nous représenter au même titre.

§ 7. *De la loi de symétrie. — Définition des parties identiques dans les cristaux.*

Le procédé de dérivation mutuelle des formes d'un même système est fondé sur une loi à laquelle Haüy a donné le nom de *loi de symétrie*, loi fort simple, qui n'est que le résultat des observations comparées et généralisées, et qui pourrait être considérée en même temps comme un pur axiome de physique. Qu'est-ce que cette loi exige en effet? que, quand une forme cristalline se modifie, la modification *se répète de la même manière, et produise le même effet* sur toutes les parties extérieures de la forme (faces, angles ou arêtes) qui sont de même espèce et *identiques* entre elles, qui se ressemblent à tel point, qu'on ne puisse rien dire de l'une, qui ne puisse également s'appliquer aux autres. Rien de plus simple que cette loi, ainsi définie d'une manière

générale. Mais l'application de cette loi présuppose une connaissance exacte des parties (angles ou arêtes), qui, dans un cristal, peuvent être regardées comme identiques entre elles, et qui doivent se comporter de la même manière; qui, étant en quelque sorte solidaires dans l'acte de la modification, doivent toutes ensemble subir les mêmes effets, parce qu'elles concourent également au développement des forces modifiantes; tandis que les parties non identiques demeurent à cet égard les unes vis-à-vis des autres dans une entière indépendance. Or, à quoi reconnaître l'*identité* des parties d'un cristal?

S'il s'agissait de corps purement géométriques, comme ceux que les mathématiciens considèrent, la réponse à cette question serait facile, tout se réduirait en effet à une simple ressemblance de forme. L'identité n'admettrait qu'une seule condition toute géométrique : il suffirait que les parties comparées fussent égales et semblables. Il est évident que, dans les corps cristallisés, la même condition doit aussi être satisfaite, sans quoi la diversité des parties serait évidente. Nous dirons donc, avec Haüy, que dans un cristal, les parties identiques ou de même espèce sont celles qui sont égales, semblables, et semblablement placées à l'égard des axes de ce cristal.

Mais cette condition géométrique est-elle suffisante? Haüy le pensait ainsi, ou du moins il supposait qu'elle devait entraîner la ressemblance sous tous les rapports; et que toute autre condition, qu'on pourrait être tenté d'y ajouter, serait superflue, comme étant implicitement contenue dans la première. Cependant, une réflexion bien simple va nous prouver la nécessité de compléter la définition précédente des parties identiques, par une nouvelle condition explicite, celle d'une ressemblance *physique* parfaite : il faut que les parties, dans lesquelles l'égalité géométrique a été reconnue, soient de plus identiques sous le rapport physique, c'est-à-dire qu'elles aient la même structure et la même constitution moléculaire.

Un cristal ne saurait être considéré comme une simple forme polyédrique ou abstraite : c'est un corps matériel, qu'on ne peut pas dépouiller de ses propriétés physiques, lorsqu'il s'agit d'expliquer un phénomène tel que la cristallisation, qui dépend uniquement des attractions auxquelles obéissent les molécules des corps pondérables. Or, s'il arrive (ce qui est en effet, et ce qui a été démontré par Haüy lui-même) que deux parties d'un cristal, quoique géométriquement semblables, aient des structures

ou constitutions moléculaires différentes, on ne peut plus dire dans ce cas qu'elles soient en tout point identiques.

Dans sa théorie de la structure des cristaux, qui sera exposée avec détail dans le cours de cet ouvrage, Haüy montre clairement que ces corps ont à l'intérieur une structure régulière et symétrique, d'où résulte une certaine texture moléculaire, qui n'est pas la même pour toutes les faces, ni pour toutes les arêtes extérieures, en sorte que ces faces ou ces arêtes peuvent se distinguer entre elles, non-seulement sous les rapports mathématiques, mais encore par leurs qualités matérielles; et il arrive souvent que, les conditions géométriques étant les mêmes, les conditions physiques sont différentes. Nous verrons bientôt que dans la même espèce minérale, dans le calcaire spathique par exemple, les mêmes molécules peuvent reproduire le même cristal apparent, la même forme géométrique, de plusieurs manières et avec des structures différentes : tel est, entre autres cas semblables, celui des deux prismes hexagonaux que l'on observe dans l'espèce précitée, et qui dérivent du rhomboèdre fondamental par des modifications tout-à-fait distinctes. Ces deux prismes ne sont pas constitués physiquement de la même manière, et si l'on compare celles de leurs faces ou de leurs parties angulaires qui se correspondent, on trouvera qu'elles présentent des différences de nature physique, qui, non-seulement ressortent de la théorie de leur structure, mais s'annoncent encore et se démontrent par l'observation directe : en effet, les clivages (1) ne sont pas disposés de la même manière dans les deux solides, l'un se clivant sur les angles, et l'autre sur les arêtes des bases. Il en est de même des stries, qui se manifestent souvent sur les faces latérales, et n'offrent pas non plus la même disposition dans les deux prismes : or, la considération des stries est importante, parce que ces accidents sont toujours en rapport avec la structure interne, et que des stries semblables et semblablement placées répondent toujours à des files de molécules parfaitement identiques.

Une diversité de structure, et par conséquent de nature physique, s'observe aussi entre des parties d'un même solide, qui sont d'ailleurs géométriquement égales et semblables. C'est

(1) On entend par *clivage*, une sorte de cassure plane, ou de division lamelleuse qui se manifeste dans beaucoup de cristaux, et qui est la conséquence de leur disposition moléculaire. Cette propriété physique des cristaux sera étudiée avec soin dans le chapitre relatif à la structure cristalline.

ce qui se voit dans chacun des prismes que nous venons de considérer. Nous avons dit que l'un d'eux se clivait sur les angles, et l'autre sur les arêtes des bases : cela est vrai ; mais il faut remarquer qu'il y a autour de chaque base six arêtes, ou six angles solides, qui sont égaux géométriquement, et cependant trois de ces parties, sur six, se prêtent seulement, de la même manière, à l'opération du clivage. Les six parties ne sont donc pas dans les mêmes conditions physiques : elles ne sont identiques que trois à trois.

Les différences de nature physique, entre des parties de forme géométriquement semblables, se décèlent non-seulement par l'observation des clivages et des stries, mais encore par l'étude de plusieurs autres propriétés physiques, dont il sera question plus tard, telles que la dureté, l'élasticité, la pyroélectricité, l'éclat, la couleur, etc. Enfin, elles se manifestent aussi par la symétrie particulière, à laquelle obéissent constamment les modifications du cristal, quand son accroissement a eu lieu d'une manière régulière. Ainsi, dans les prismes hexagonaux du calcaire, les douze arêtes des bases, ou les douze angles solides, ne subissent pas tous à la fois les mêmes modifications : il n'y a généralement que six parties sur douze, qui se modifient ensemble et de la même manière; les six autres restent intactes, ou se modifient d'une manière différente, et par conséquent se comportent comme elles le feraient, si elles étaient géométriquement distinctes des premières. C'est ce qu'indiquent la figure 68, pl. VII, et toutes celles qui montrent le passage de la forme hexagonale à la forme rhomboédrique. Ainsi, dans les prismes hexagonaux du calcaire, comme dans tous ceux des espèces rhomboédriques, les angles et les arêtes des bases ne sont identiques que six par six. Au contraire, dans les prismes hexagonaux de l'émeraude et de plusieurs autres espèces, où cette forme n'est jamais associée au rhomboèdre, les douze arêtes, ou les douze angles des bases, se modifient toujours ensemble, comme on le voit figure 63; cette circonstance suffit pour dénoter l'identité absolue des douze parties dans les prismes d'émeraude, ce que confirmerait d'ailleurs l'étude des mêmes cristaux sous le rapport de leurs autres propriétés physiques (1).

(1) Voyez le mémoire qui a pour titre : *De la Structure des Cristaux*, considérée comme base de la distinction et de la classification des systèmes cristallins, et que j'ai présenté comme thèse à la Faculté des sciences, en sept. 1840.

Il résulte de ce qui précède, qu'il est nécessaire de compléter la définition des parties identiques donnée par Haüy, en ajoutant que les parties déjà semblables de forme doivent l'être de plus *physiquement* ou de structure, en sorte que l'identité absolue comporte deux conditions : l'une géométrique et l'autre physique. Il suit encore de là que la même forme géométrique, considérée comme forme cristalline, et par conséquent au point de vue physique, peut présenter dans des espèces minérales différentes un caractère différent de symétrie, résultant d'une modification importante dans la structure interne, qui ne tombe pas immédiatement sous les sens. Il faut donc établir une distinction entre la symétrie réelle d'un cristal, considéré comme corps matériel, laquelle dépend à la fois de sa forme et de sa structure moléculaire, et la symétrie apparente du même corps, considéré comme corps géométrique, celle-ci se rapportant uniquement à sa forme extérieure. Il arrive le plus souvent que les deux sortes de symétrie sont d'accord dans le même cristal; mais le contraire peut avoir lieu, et dans le cas où la symétrie réelle diffère de la symétrie purement géométrique, après avoir reconnu les parties de la forme (faces, arêtes ou angles) qui sont égales ou inégales, on est obligé d'avoir recours à de nouvelles distinctions, en sous-divisant certains groupes de parties égales, pour arriver aux parties qui sont véritablement identiques.

§ 8. *Modifications holoédriques, hémiédriques et tétartoédriques.*

Voici comment cette subdivision s'opère dans le plus grand nombre des cas, et quelles sont les dénominations usitées pour distinguer les diverses symétries que l'on peut rencontrer dans un même type géométrique. Lorsque la symétrie réelle concorde entièrement avec celle de la forme géométrique, c'est-à-dire lorsque toutes les parties géométriquement égales sont physiquement identiques, chaque modification du type fondamental les atteint toutes à la fois, et par conséquent produit en somme le *maximum* de faces possible : on donne à cette modification, et aussi à la forme qui en résulte, le nom de *holoédrique*, pour exprimer qu'elle se compose de la totalité des faces, qui dériveraient du type considéré d'une manière abstraite. Lorsque la concordance dont nous venons de parler n'a pas lieu, d'ordinaire il arrive que les parties géométriquement égales

ne sont identiques que moitié par moitié du nombre total : dans ce cas, la modification ne se répétant que sur une des moitiés, ne produit que la moitié du nombre des faces que l'on avait dans le cas précédent : on lui donne le nom de *modification hémiédrique*. Plus rarement, la concordance entre les caractères géométriques et physiques des parties extérieures de la forme n'a lieu que pour le quart seulement du nombre total de celles qui sont géométriquement égales : la modification n'atteint alors que le quart de ces parties, elle ne produit que le quart du nombre des faces que l'on aurait pour une concordance complète. On donne à cette modification, comme aussi à la forme qui en résulte, le nom de *tétartoédrique*. Une tétartoédrie n'est, à proprement parler, qu'une hémiédrie de second ordre, une hémiédrie nouvelle, subie par une forme, que l'on regarde comme provenant elle-même de l'hémiédrie d'une autre forme. Les termes d'*holoédrie*, d'*hémiédrie* et de *tétartoédrie*, peuvent donc servir à désigner les trois genres ou degrés différents de symétrie, caractérisés l'un par l'identité physique de *toutes* les parties géométriquement égales, et les deux autres par l'identité de ces mêmes parties, prises seulement *par moitié* ou par *quart* du nombre total. Mais la distinction entre les parties égales pouvant s'établir de différentes manières, il y a plusieurs cas possibles d'*hémiédrie* ou de *tétartoédrie* pour le même solide. Nous verrons plus loin, par exemple, que certaines modifications hémiédriques produisent toujours des formes *à faces parallèles* deux à deux, tandis que d'autres modifications ne produisent que des formes *à faces inclinées* chacune à chacune, ou dans lesquelles on n'observe aucun couple de faces parallèles. Cette observation a donné lieu à la division de l'hémiédrie en deux genres : l'*hémiédrie* à faces parallèles, ou para-hémiédrie, et l'*hémiédrie à faces inclinées*, ou anti-hémiédrie, qu'on peut appeler aussi *hémiédrie polaire*.

Nous verrons aussi que les deux formes conjuguées, que peut produire une des différentes sortes d'hémiédrie, lorsque la modification porte successivement sur une moitié, puis sur l'autre des parties égales, sont tantôt superposables par un simple changement de position, et tantôt non superposables ; parce que, dans ce dernier cas, elles ne sont qu'inversement semblables, les parties respectivement égales étant disposées en sens contraire, dans l'une et dans l'autre, comme dans les polyèdres inverses ou symétriques de la géométrie ordinaire.

Nous indiquerons ailleurs l'utilité de ces distinctions, et la

raison de plusieurs des dénominations qui s'y rapportent. Pour le moment, nous nous bornerons à rappeler ici un seul exemple d'une forme géométrique, qui peut revêtir successivement, dans des espèces minérales différentes, un caractère différent de symétrie, et devenir ainsi la souche de plusieurs systèmes de formes, que l'on observe toujours isolément, et qui ne semblent pas pouvoir se réunir dans la même espèce, parce que les symétries dont ils dérivent sont difficiles, pour ne pas dire impossibles à concilier. Cet exemple est tiré de la forme cubique. Il n'existe qu'un seul cube en géométrie : mais, dans la nature matérielle et parmi les cristaux, il y a au moins trois sortes de cubes, qui diffèrent sous le rapport physique et cristallographique : tels sont ceux de la galène, de la pyrite commune et de la boracite. Par une étude attentive de la marche que suivent, dans chacun de ces cubes, les diverses propriétés physiques et l'ensemble des modifications, on acquiert la preuve que ces trois espèces de cubes sont essentiellement distinctes par leur structure et leur symétrie particulière; qu'elles doivent être composées chacune de molécules d'une forme différente, comme le montrent les figures 18, 19 et 20, pl. I; et que par conséquent il existe au moins trois systèmes cristallins différents, auxquels la forme cubique peut être commune, mais dans chacun desquels elle se rencontre avec d'autres formes qui sont caractéristiques et propres à l'espèce. L'un de ces systèmes (celui de la galène) est le système cubique à modifications toutes holoédriques. Les deux autres sont des systèmes cubiques à modifications hémiédriques; et l'un d'eux (celui de la pyrite) nous offrira le cas de la para-hémiédrie, tandis que le second (celui de la boracite) nous fournira un bel exemple de l'hémiédrie polaire, ou anti-hémiédrie.

On voit par ce qui précède, que quand on se borne à la considération de la forme géométrique, pour en conclure le caractère de symétrie d'un cristal, on n'est jamais sûr de connaître celui-ci d'une manière exacte : ce n'est là qu'une détermination provisoire, qui a besoin d'être vérifiée par l'étude des propriétés physiques de ce cristal, ou des rapports de sa forme avec celles des autres cristaux de la même espèce. C'est donc l'observation ou l'expérience qui doit assigner à une forme fondamentale son véritable caractère, et servir de base à la distinction des parties identiques ou non identiques, et par suite à la délimitation des systèmes cristallins.

§ 9. *De l'application de la loi de symétrie.*

Revenons maintenant à la loi de symétrie, que nous n'avons exposée que d'une manière très-générale, et entrons à son sujet dans tous les développements nécessaires pour en rendre l'application facile. Cette loi exige impérieusement que la modification, quelle qu'elle soit, qui se produit sur une partie quelconque d'un cristal, se répète exactement sur toutes les autres parties qui sont identiques à la première; mais elle fait plus : elle règle encore le nombre et la disposition des facettes dont se compose la modification d'une partie considérée isolément; car cette modification peut avoir lieu par une ou plusieurs facettes, et par conséquent de plusieurs manières différentes. En général, la modification doit être telle qu'elle fasse un tout parfaitement symétrique avec la partie qu'elle remplace, ou à laquelle elle s'ajoute; et par conséquent, s'il entre dans la composition de cette partie angulaire plusieurs faces, ou plusieurs angles dièdres qui soient identiques, la modification devra produire le même effet sur chacune des faces égales, ou chacun des angles dièdres égaux. Les facettes particulières, dont se compose la modification totale d'un angle ou d'une arête solide, doivent donc toujours être en rapport, pour le nombre et les positions, avec les faces qui concourent à la formation de cet angle ou de cette arête solide. Examinons successivement les divers cas qui peuvent se présenter.

1° *Modifications des arêtes.* — Si l'arête à modifier est un coin régulier, c'est-à-dire si elle est formée de deux faces identiques et semblablement placées relativement à leur ligne d'intersection, elle pourra être modifiée de deux manières différentes : ou par une seule facette également inclinée sur les deux faces du coin (*troncature* simple et tangente), ou par deux facettes obliques, mais faisant la même inclinaison, l'une sur la première face, et l'autre sur la seconde, c'est-à-dire par un *biseau symétrique*.

Si l'arête à modifier est formée par des faces non identiques, ou diversement placées à l'égard de leur intersection commune (1), la modification a lieu dans ce cas par une simple facette, inclinée différemment sur les deux faces.

(1) Des faces, même identiques, mais présentant leurs parties (physiques) homologues dans des situations diverses à l'égard de leur intersection, déter-

2° *Modifications des angles solides.* — Si l'angle solide à modifier est un angle régulier, composé de *m* faces identiques, il pourra être modifié de quatre manières différentes, et seulement de quatre manières, sous la condition que chaque modification ne produise qu'une forme simple. La modification pourra être formée d'une seule facette, également inclinée sur toutes les faces de l'angle; ou bien elle sera composée de *m* facettes, placées respectivement sur les *m* faces de l'angle, dans une position oblique et symétrique, de telle manière qu'elles aient chacune la même inclinaison sur celle des faces correspondantes; ou bien encore de *m* facettes, placées symétriquement, non plus sur les faces (comme dans le cas précédent), mais sur les angles dièdres; ou enfin de 2*m* facettes, placées obliquement deux à deux sous forme de biseaux, au-dessus des faces ou des angles dièdres, et formant, par leur concours, un nouvel angle solide, d'un nombre de faces double, symétrique et semi-régulier, c'est-à-dire ayant ses angles plans, ainsi que ses angles dièdres, égaux seulement de deux en deux.

Si l'angle solide est composé de *m* faces, parmi lesquelles il y en ait un nombre *n*, qui soient identiques entre elles, les autres étant différentes, il pourra être modifié ou par une seule facette également inclinée sur chacune des *n* faces égales, ou bien par *n* facettes, placées respectivement sur ces dernières et semblablement inclinées sur elles.

Si l'angle solide est complètement irrégulier, la modification a lieu par une seule facette, diversement inclinée sur les faces composantes.

Tels sont les différents cas que l'on peut avoir à rencontrer dans l'application de la loi de symétrie au développement des systèmes cristallins, c'est-à-dire à la solution du problème qui consiste à déduire, par de simples considérations de symétrie, toutes les formes génériques d'un système cristallin de l'une quelconque d'entre elles, prise pour type, pour forme primitive ou fondamentale. Sans doute, il serait possible (comme le montre d'ailleurs l'observation des combinaisons ternaires, quaternaires, etc., de formes cristallines) de modifier symétriquement une partie de forme dominante par un plus grand nombre de facettes que nous ne l'avons supposé ici; mais alors il résulterait d'une pareille modification une forme composée, susceptible de

minent par cela seul l'obliquité et la simplicité de la modification, comme le feraient des faces non identiques. C'est ce qui a lieu pour la modification des arêtes du cube, dans la pyrite.

se décomposer en formes simples : la modification en question serait donc elle-même une modification multiple. Il ne faut pas oublier que nous sommes convenus de restreindre le problème à la recherche des seules formes simples.

Les conditions rigoureuses de la loi que nous venons d'exposer, limitent nécessairement le nombre des modifications admissibles, et par conséquent le nombre des formes simples du système. On voit toute l'importance de cette loi de symétrie, qui permet au cristallographe de circonscrire nettement, et, pour ainsi dire, d'embrasser d'un seul coup d'œil l'ensemble des formes sous lesquelles un minéral peut s'offrir. On voit aussi combien est devenue facile l'étude des différents systèmes cristallins, laquelle nous avait paru inabordable, avant toutes les simplifications que nous lui avons fait subir. Nous n'aurons plus maintenant qu'à développer successivement chacun de ces systèmes, à l'aide de la méthode des troncatures, éclairée et dirigée par la loi de symétrie.

Dès l'instant que l'on a fait choix d'une forme fondamentale et que son véritable caractère de symétrie (c'est-à-dire la corrélation exacte de ses parties, établie sur leur identité physique et géométrique) a été reconnu par l'observation, le problème qui consiste à déduire de cette forme *primitive* ou *fondamentale* toutes les autres formes du système, qui, relativement à elle, prennent le nom de formes *secondaires* ou *dérivées*, n'est plus qu'un problème abstrait, une question de pure géométrie. Le choix de la forme fondamentale est arbitraire : cependant, il est naturel de prendre son point de départ parmi les formes les plus simples de chaque système, qui sont les octaèdres et les parallélipipèdes, ou plus généralement les formes bipyramidales et prismatiques. Nous prendrons pour types fondamentaux les formes prismatiques. Tous les systèmes cristallins que l'observation a fait connaître, peuvent se ramener à six types géométriques : il existe donc au moins six genres différents de systèmes cristallins. Mais, parce que la même forme *géométrique* peut, dans la série des espèces minérales, changer de structure et de caractère de symétrie, nous serons conduits à admettre des subdivisions dans chacun de ces genres, à reconnaître plusieurs systèmes particuliers prenant leur origine dans une forme géométrique commune, qui se différentiera dans chacun d'eux, au point de vue cristallographique, par des qualités physiques distinctes, et par une structure moléculaire différente.

§ 10. *Exceptions apparentes à la loi de symétrie. — Disparition accidentelle de certaines faces. — Hémiédrie proprement dite.*

On a cru pouvoir signaler des exceptions à la loi de symétrie: mais il est évident que ces exceptions sont plus apparentes que réelles. Il est un cas bien connu, où, par suite de l'accroissement inégal qu'un cristal a subi dans son pourtour, quelques-unes de ses facettes ont avorté, ou bien se sont évanouies après s'être produites, parce que les facettes voisines, en s'étendant outre mesure, ont pris leur place. Ce n'est là, évidemment, qu'une exception particulière et accidentelle, qui n'affecte point toute l'espèce, mais seulement le cristal individuel que l'on observe, et que l'on doit mettre sur le compte de l'irrégularité du cristal.

A part cette circonstance, et en admettant que l'accroissement des cristaux se fasse d'une manière uniforme et régulière, on conçoit difficilement comment la loi de symétrie pourrait souffrir des exceptions dans un cristal dont toutes les parties seraient exactement proportionnées. Cependant, plusieurs cristallographes, au nombre desquels Haüy lui-même doit être compté, ont admis des cas où cette loi leur a semblé être en défaut, et où l'exception leur apparaissait comme une anomalie constante, en ce qu'elle affectait généralement et au même degré tous les cristaux de l'espèce. Ces cas sont ceux des minéraux qu'on nomme *pyrite*, *boracite*, *tourmaline*, *quarz*, etc., et il est à remarquer que les prétendues formes anormales rentrent toutes dans la catégorie de celles que nous avons appelées *hémiédriques*. Or, lorsque nous traiterons de ces espèces, nous ferons voir que les modifications qui engendrent ces formes hémiédriques, sont ce qu'elles doivent être, lorsque l'on tient compte des conditions physiques du type dont elles dérivent, et que l'exception n'existe que pour ceux qui les rapportent à une forme purement abstraite. Si donc on a pu croire ici à une anomalie, c'est que l'on a fait une fausse application de la loi, en se méprenant sur la nature des parties, auxquelles on a, sans preuve suffisante, attribué une égale valeur. Nous avons établi d'une manière générale, et nous prouverons ce fait en particulier pour chacune des espèces précitées, que des parties semblables de forme peuvent être physiquement différentes. Dès-lors, toutes les fois que la loi de symétrie paraît en désaccord, et cela d'une manière constante, avec les indications du type géométrique, il y a lieu d'examiner, avant de prononcer

les mots d'exception et d'anomalie, si, dans ce type, quelques parties de même forme ne cacheraient pas, sous une ressemblance purement extérieure, des propriétés physiques différentes.

§ 11. *Discussion sur la véritable nature de l'hémiédrie.*

Il est bien constant que tel est le cas de la plupart des cristaux, dans lesquels l'hémiédrie se présente comme une circonstance habituelle : dans la pyrite, la boracite, la tourmaline et le quarz, l'hémiédrie est la conséquence nécessaire de la constitution moléculaire, ou de la structure interne du corps cristallisé. Maintenant, existe-t-il d'autres cristaux, les uns holoèdres, les autres hémièdres, qui ne diffèrent en aucune manière dans l'intérieur de leur masse, de telle sorte qu'à leur égard l'hémiédrie ne se trouvant point motivée par des différences de structure, doive être mise sur le compte de causes extérieures, de circonstances accidentelles ? C'est ce qui n'est nullement prouvé, et ce qui est infiniment peu probable ; car, comment concevoir cette action du milieu environnant, qui, dans le cas de la pyrite, par exemple, s'exercerait diversement, à droite et à gauche de chaque arête du cube fondamental, de manière à permettre d'un côté la production d'une facette, et à l'empêcher du côté opposé, si tout était parfaitement égal et symétrique, relativement au plan mené par cette arête et par le centre ? Dans cette hypothèse, où tout est géométriquement et physiquement identique au-dessus et au-dessous de ce plan, les deux moitiés du cristal, développant les mêmes forces moléculaires, et tendant, par conséquent, à s'accroître de la même manière, comment imaginer que le milieu puisse contrarier cette tendance et substituer à la forme holoédrique, dont la symétrie s'accorderait si bien avec la structure interne, une forme hémiédrique qui n'est plus en rapport avec elle ? L'hémiédrie, envisagée de cette façon, sans changement de système cristallin ni de structure, et comme ayant lieu seulement par la seule influence des milieux, est, jusqu'à ce moment, un fait inexplicable, une sorte d'effet sans cause.

L'hémiédrie, en tant qu'elle consiste dans une concordance partielle des parties géométriquement égales, sous le rapport des propriétés physiques, concordance qui seule les rend aptes à se modifier ensemble et de la même manière, est un fait bien constant, et beaucoup plus commun que ne le croyait Haüy. Le professeur Weiss a eu le mérite de le reconnaître dans toute sa gé-

D'un autre côté, l'hémiédrie accidentelle, admise trop légèrement, comme un fait général et commun à tous les systèmes, tend à diminuer l'importance des formes cristallines, et surtout des considérations symétriques sur lesquelles se fonde leur étude. On ne saurait donc se montrer trop difficile sur la valeur des preuves qui pourraient établir ce fait, d'autant mieux que, si dans chaque espèce minérale, les formes peuvent se montrer indistinctement avec toutes leurs faces, ou seulement avec la moitié de leur nombre, on ne voit pas pourquoi, jusqu'à présent, un si petit nombre de minéraux ont offert le cas de l'hémiédrie, ni pourquoi les deux genres de formes hémiédriques, qu'à l'exemple des minéralogistes allemands nous avons distingués plus haut, ne se sont jamais rencontrés dans la même espèce (1).

En résumé, l'hémiédrie est un fait qui, ramené à sa juste valeur, ne porte aucune atteinte aux lois connues de la cristallisation, et ne peut donner lieu à établir un nouveau principe. La génération des formes hémiédriques s'opère d'après la règle

(1) Dans ses *Eléments de Cristallographie*, M. G. Rose, après avoir décrit les formes hémiédriques du système régulier, qu'il partage en formes hémiédriques à faces inclinées et formes hémiédriques à faces parallèles, fait remarquer que ces deux genres de formes, dont le premier a pour type le tétraèdre, et le second le dodécaèdre pentagonal, n'ont point encore été observées en combinaison l'une avec l'autre, et il ajoute que c'est un fait dont on ne voit pas bien la raison. Il est certain qu'au point de vue allemand de l'hémiédrie ce fait ne serait pas explicable; mais il n'en est pas de même dans la manière de voir que je défends ici; aussi, me fondant sur l'incompatibilité apparente des deux genres de structure par lesquels on peut se rendre compte de l'une et de l'autre forme, je n'ai pas hésité à dire (*Thèse sur la Structure des Cristaux*, p. 8) que l'on ne rencontrera point ensemble, dans une même substance, les deux formes hémiédriques précitées, savoir : le tétraèdre régulier et le dodécaèdre pentagonal. Dans ses belles *Etudes cristallographiques*, p. 139, M. Bravais pense que j'ai été trop loin, en m'exprimant ainsi, et il semble, en effet, que mon assertion ait été détruite par les observations de M. Rammelsberg sur les formes du chlorate de soude, parmi lesquelles on rencontre des cristaux qui ont l'apparence du tétraèdre, avec d'autres qui offrent celle du dodécaèdre de la pyrite. Mais celui-ci ne pourrait être déduit du tétraèdre régulier, qui est déjà une forme hémiédrique, que par une nouvelle hémiédrie du scalénoèdre à 24 faces, l'un des dérivés naturels du tétraèdre; il doit donc offrir, dans sa structure, le caractère propre aux formes tétartoédriques. On arriverait à la même conséquence pour le tétraèdre, si on cherchait à le déduire du dodécaèdre pentagonal. C'est ce que M. Naumann a parfaitement bien démontré dans la dernière édition de ses *Eléments de Cristallographie*. Les deux formes observées par M. Rammelsberg ne sont donc pas les deux solides hémièdres ordinaires : ce sont des solides tétartoèdres, qu'il faut considérer comme de simples limites ou des cas particuliers d'autres formes d'un aspect généralement irrégulier, et qui, en prenant accidentellement une apparence plus simple, n'en conservent pas moins à l'intérieur la structure et le genre de dissymétrie propres aux formes tétartoédriques.

commune; et les modifications qui les produisent, n'échappent point à la loi de symétrie bien entendue. Toutes les fois qu'un même solide géométrique appartient à plusieurs groupes différents de formes, il présente, dans chacun d'eux une loi particulière de structure et de symétrie. Chaque mode réellement distinct d'hémiédrie ou de tétartoédrie a pour cause un changement dans la forme de la molécule, et, par suite, dans la polarité des axes : il en résulte une modification dans la symétrie générale, un véritable changement de système. Les diverses séries de formes hémiédriques, qu'amènent ces modifications dans la polarité, ne doivent pas être considérées seulement comme des subdivisions du système qui comprend, au nombre de ses formes simples, les formes holoédriques correspondantes; chacune d'elles détermine un nouveau système : car, les solides d'apparence holoédrique, qui se rencontrent avec elles dans une même espèce, et qui n'accusent pas l'hémiédrie par leur aspect, l'accusent toujours par leur structure, par leurs propriétés physiques, et par la marche particulière de leurs modifications, le même caractère de symétrie devant se retrouver dans toutes les formes coexistantes; et comme ce caractère doit exister aussi dans la molécule, il suffit, pour se rendre compte de la structure des cristaux hémièdres, de composer leur réseau cristallin de molécules ayant elles-mêmes une forme hémiédrique, et l'on choisira naturellement la plus simple, savoir : le tétraèdre, dans le cas de la boracite, et le dodécaèdre pentagonal dans celui de la pyrite commune (*voyez* figures 19 et 20, pl. I). Cette préférence que je donne maintenant à un polyèdre moléculaire qui accuse la symétrie par sa forme, sur d'autres qui ne l'exprimeraient que par leur structure atomique, a été indiquée par moi, pag. 26 de la Thèse déjà citée; et, depuis, j'ai toujours eu recours à ce moyen avantageux dans mes leçons à la Sorbonne (1).

(1) Dans un *Mémoire sur la cristallisation,* inséré au tome VIII des *Savants étrangers*, et dont la publication a précédé celle de la Thèse dont j'ai parlé ci-dessus, j'avais expliqué la structure de quelques cristaux hémièdres, au moyen de molécules qui n'accusaient l'hémiédrie que par leur structure. J'ai eu le malheur de ne pas être compris par M. Dufrénoy dans ce que j'ai dit relativement à la pyrite, et ce savant distingué me prête, à cet égard, des idées qui ne sont pas les miennes, dans le Ier volume de son *Traité de minéralogie,* p. 59 et p. 213. Je répondrai plus loin aux objections qu'il m'a faites; je montrerai que les prétendues difficultés qu'il voit dans mon explication de l'hémiédrie, en ce qui concerne la pyrite et la tourmaline, n'existent réellement pas, et que cette explication peut être étendue à tous les cas d'hémiédrie sans exception : car, il suffit pour cela de prendre dans chaque cas particulier, pour représenter la molécule, la plus simple des formes hémiédriques observées dans l'espèce minérale.

J'ai eu la satisfaction de voir que M. Leymerie, professeur à la Faculté des sciences de Toulouse, a été conduit de son côté à l'adoption du même principe, et je m'applaudis beaucoup de me trouver d'accord sur ce point, comme sur beaucoup d'autres, avec un esprit aussi éclairé et aussi judicieux.

§ 12. *Loi de dérivation des faces par les multiples ou par les parties aliquotes des axes. — Signes cristallographiques.*

Après avoir exposé avec tous les détails nécessaires la *loi de symétrie,* qui est la clef de la connaissance des systèmes cristallins, nous aurions maintenant à en faire l'application aux différentes formes admises comme fondamentales par les cristallographes, pour arriver par ce moyen au développement de chacun des systèmes qu'ils ont observés; mais auparavant, nous devons faire connaître la seconde des lois générales de la cristallisation que nous avons mentionnées ci-dessus, savoir : la *loi de dérivation* des faces cristallines, par des troncatures rationnelles, loi qui règle leurs directions ou positions relatives, et par conséquent leurs inclinaisons mutuelles, et qui nous permettra de calculer les angles dièdres des cristaux les uns par les autres.

La loi dont il s'agit est une loi de proportionnalité pour les axes des formes cristallines, qui représente exactement en cristallographie celle des proportions multiples dans la chimie minérale. Rappelons-nous la définition que nous avons donnée des *axes* de cristallisation : ce sont des lignes de symétrie, qui passent par le centre du cristal et vont aboutir aux sommets des angles solides opposés, ou bien au milieu des faces ou des arêtes. Rappelons-nous encore que toutes les formes d'un même système ayant la même symétrie, tous les axes qui ont été observés et déterminés dans l'une, se retrouvent dans les autres exactement dans les mêmes positions relatives, en sorte que si toutes les formes sont convenablement orientées, les axes correspondants peuvent être respectivement parallèles. On doit toujours supposer les formes cristallines d'un même système placées les unes relativement aux autres, de manière à satisfaire à cette condition d'un parallélisme général entre leurs axes correspondants : c'est ce que l'on exprime lorsqu'on dit qu'elles sont en *position parallèle* les unes à l'égard des autres. Cela posé, si l'on ne considère plus seulement la position de ces axes, qui est la

même dans toutes les formes du système, mais leur longueur, on trouve que les longueurs relatives des axes correspondants varient en général, lorsqu'on passe d'une forme simple fermée, à une autre forme fort simple. En d'autres termes, si l'on se représente les diverses formes comme étant toutes construites autour d'un même centre et d'un même système d'axes de longueur infinie, les distances, par rapport au centre, auxquelles les faces de chacune d'elles couperont les axes, ne seront pas généralement les mêmes; et si l'on part d'une forme particulière dans laquelle ces portions d'axes aient des valeurs déterminées, il faudra, pour avoir celles qui se rapportent à une autre forme, multiplier ou diviser les premières valeurs par de certains coëfficients numériques. Or, voici quel est l'énoncé de la loi qui règle cette multiplication des axes.

Soient OX, OY, OZ, fig. 38, pl. III, trois axes passant par le centre o d'un cristal. Supposons qu'une face cristalline ABC, faisant partie d'une des formes simples du système, coupe les axes à des distances OA, OB, OC, égales à a, b, c : toute autre face, A' B' C', du même système, coupera les mêmes axes à des distances a', b', c', qui seront aux premières dans des rapports simples et rationnels; c'est-à-dire que l'on aura : $a':b':c' = ma:nb:pc$, m,n,p étant des nombres entiers ou fractionnaires, le plus souvent très-petits. Ce caractère de quantités rationnelles, que présentent toujours les valeurs des coëfficients m, n, p, a fait donner aussi à la loi dont nous nous occupons, le nom de *loi de rationnalité*. On pourrait encore l'appeler loi de dérivation par les multiples des axes fondamentaux. Car, comme on ne peut déterminer que les valeurs relatives a', b', c', lesquelles sont suffisantes pour faire connaître la direction du plan A'B'C', on est maître de multiplier ou de diviser les trois coëfficients m, n, p, par le même nombre à la fois, et, par conséquent, si ces coëfficients sont fractionnaires, on pourra les ramener tous à la forme de nombres entiers: il suffira pour cela de les transformer d'abord en fractions de même dénominateur, et de supprimer ensuite le dénominateur commun. Tels sont les signes dont a fait usage le professeur Weiss, et l'on voit que la loi qu'ils expriment, est une loi de nombres entiers généralement fort simples.

On peut aussi, dans tous les cas, représenter la relation $a':b':c'$ par $\frac{1}{g}.\,a:\frac{1}{h}.\,b:\frac{1}{k}.\,c$, en réduisant tous les coëfficients à la forme de fractions ordinaires dont le numérateur soit 1;

il suffit pour cela de réduire les coëfficients en fractions de même numérateur, et de diviser ensuite toutes ces fractions par le numérateur commun. M. Neumann, et quelques autres cristallographes après lui, ont donné la préférence à cette seconde forme. En l'adoptant, on peut dire que la dérivation des faces s'obtient en prenant des sous-multiples, ou parties aliquotes des axes fondamentaux.

Enfin, on peut encore, si on le juge à propos, exprimer la relation générale $ma:nb:pc$ en partie par des coëfficients entiers, et en partie par des coëfficients fractionnaires. Entre toutes ces expressions parfaitement équivalentes, on choisira dans chaque cas celle qui paraîtra la plus simple, ou qui facilitera davantage les calculs cristallographiques.

Les trois axes OX, OY, OZ, peuvent être considérés comme des axes de coordonnées, auxquels on rapporte la position des divers plans d'un système cristallin. Il y a seulement cette différence entre la cristallographie et la géométrie analytique, qu'ici ces axes ne sont pas choisis tout-à-fait arbitrairement, mais qu'ils doivent être pris dans les cristaux eux-mêmes. Or, en géométrie, on donne le nom de *paramètres* aux trois sections OA, OB, OC, faites sur les axes par un plan ABC; on peut donc aussi donner ce nom aux quantités a, b, c, qui sont les constantes de la dérivation des faces secondaires : les coëfficients m, n, p s'appelleront les coëfficients de dérivation, les coëfficients paramétriques, ou simplement les *indices* ou *caractéristiques* du plan secondaire, celui-ci pouvant être représenté par le symbole $(ma:nb:pc)$ que l'on nomme son *signe cristallographique*; ou même par le signe encore plus simple (mnp), pourvu qu'on se rappelle celui des axes auquel chacun des coëfficients se rapporte, d'après la place qu'il occupe dans le signe général, dont celui-ci n'est qu'une abréviation (1).

La loi précédente n'a pas lieu seulement pour un système d'axes composé de trois seulement, mais pour un système quelconque d'axes, menés tous par le centre. Quel que soit le nombre de ceux qui s'y croisent, ils sont tous coupés par les faces cristallines dans des rapports rationnels. Ainsi, que l'on se représente

(1) Le signe cristallographique $ma:nb:pc$ équivaut à l'équation du plan, rapporté aux trois axes de cristallisation, laquelle est, en fonction des paramètres, $\frac{x}{ma}+\frac{y}{nb}+\frac{z}{pc}=1$.

(Voyez sur ce point l'Appendice placé à la fin de ce volume.)

les quatre axes, qui, dans une forme octaédrique, vont aboutir au milieu des faces, et que ces axes, de longueur déterminée, soient entre eux comme $a:b:c:d$, tout plan cristallin sera dirigé de manière à couper les mêmes axes (prolongés, s'il est nécessaire) dans les rapports $ma:nb:pc:qd$; m, n, p et q étant des quantités rationnelles, et même, si l'on veut, des nombres entiers; et il en serait de même pour un nombre d'axes plus considérable. Seulement, comme trois des paramètres ma, nb, pc et qd suffisent pour déterminer complètement la position du plan, on sent bien que lorsqu'on considère plus de trois axes, il doit y avoir entre les indices m, n, p, q, etc., des relations qui permettent de les calculer tous, dès que trois d'entre eux seulement sont connus. Dans le cas de quatre axes, si l'on suppose que les indices m et n se rapportent, non pas à deux axes consécutifs, mais à deux axes pris alternativement, sur l'angle solide déterminé par leur concours, on aura la relation très-simple

$$\frac{mn}{m+n} = \frac{pq}{p+q} \quad (1),$$

que l'on peut mettre aussi sous cette forme

$$\frac{1}{m} + \frac{1}{n} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}.$$

Enfin, la même loi de proportionnalité des segments ou paramètres correspondants n'a pas lieu seulement pour les axes de la forme, que l'on a choisie comme primitive, mais encore pour les arêtes de cette forme, et généralement pour toutes les droites, qui, dans la série infinie des formes d'un même système, remplissent les fonctions d'axes ou d'arètes, et sont toujours déterminées par les intersections mutuelles des faces (2). Il est facile de voir, en effet, que les mêmes lignes, qui, dans une forme pyramidale, jouent le rôle d'axes, remplissent à leur tour la fonction d'arêtes dans une forme prismatique; et réciproquement. Tel est le cas de l'octaèdre et du parallélipipède de la figure 39, qui nous montre ces deux formes inscrites ou circonscrites l'une à l'autre, de manière que les faces du parallélipipède sont tangentes en leur milieu aux angles de l'octaèdre et

(1) Voyez le même Appendice.

(2) C'est ce qui a porté les cristallographes allemands à généraliser la définition des *axes* des cristaux, que nous avons donnée p. 28. Pour eux, toute droite, menée du centre d'un cristal, et qui est susceptible d'être coupée dans des rapports rationnels par tous les plans du sytème, est un *axe*.

parallèles aux sections principales de ce même solide. De ce rapport entre les deux formes, il résulte évidemment que les arêtes du prisme circonscrit sont égales et parallèles aux axes de l'octaèdre. Ces deux formes, que nous appellerons *corrélatives*, sont déterminées par les mêmes paramètres, ou axes finis, avec cette différence que les faces de l'une passent par les trois axes à la fois, tandis que celles de l'autre ne coupent chacune qu'un seul axe, étant parallèles aux deux autres.

On remarquera que les formes qui offrent ce genre de corrélation, sont telles que les faces de l'une peuvent être considérées comme des modifications *tangentes* aux angles de l'autre, en prenant ici ce mot de *tangentes* dans le sens cristallographique que nous lui avons donné ailleurs (pag. 43). Ces deux formes jouissent encore d'une propriété remarquable, relativement à la dérivation des faces secondaires : les signes de ces faces restent absolument les mêmes, qu'on les rapporte aux axes de l'une, ou aux arêtes de l'autre. C'est ce que montre clairement la fig. 40, dans laquelle les paramètres oa, ob, oc, comptés sur les axes, sont respectivement égaux et parallèles aux segments $o'a'$, $o'b'$, $o'c'$, pris sur les arêtes, ce qui entraîne le parallélisme ou l'identité de direction des deux plans dérivés abc et a', b', c'.

§ 13. *Des signes à caractéristiques nulles ou infinies. — Notation particulière, dans laquelle on n'emploie que des caractéristiques finies.*

Le signe $(ma:np:pc)$ peut être considéré comme l'expression d'une loi particulière de troncature des axes par un des plans du système; il semble supposer que ce plan coupe à la fois les trois axes, et il fait connaître dans quel rapport il les coupe, en comptant les segments à partir de l'origine. Mais, il arrive pour un très-grand nombre de plans du système, et même pour ceux que l'on observe le plus fréquemment sur les cristaux naturels, que ces plans ne rencontrent pas tous les axes, étant parallèles à un ou plusieurs d'entre eux; et le signe dont il est question, pour posséder toute la généralité désirable, doit pouvoir exprimer cette circonstance. Or, dire qu'un plan est parallèle à une droite, cela revient à dire, en langage géométrique, qu'il va la couper à une distance infinie.

Supposons donc qu'un certain plan du système soit parallèle à l'axe a, le paramètre du plan, relatif à cet axe, aura une valeur

infiniment grande, et pourra être représenté par ∞a, en se servant de ∞ comme symbole de l'infini. Ainsi, le signe ($\infty a : nb : pc$) désigne une face parallèle à l'axe a, et qui coupe les deux autres axes b et c à des distances finies; le signe ($\infty a : \infty b : pc$) en désigne une autre, qui est parallèle à la fois aux deux premiers axes a et b. Dans les deux formes corrélatives, fig. 39, pl. III, ($ma : \infty b : \infty c$), ($\infty a : nb : \infty c$), ($\infty a : \infty b : pc$) désigneront les trois faces adjacentes du parallélipipède circonscrit, tandis que les faces de l'octaèdre inscrit seront exprimées chacune par un signe de la forme ($ma : nb : pc$), où il n'entre que des quantités finies.

Le signe ($ma : nb : pc$) a donc toute la généralité qu'on peut désirer; son emploi ne peut laisser aucune ambiguité sur la position du plan qu'il représente, à l'égard des axes, si, comme nous le dirons dans un instant, et comme on le fait dans la géométrie analytique, on affecte chacun des coëfficients paramétriques du signe + ou du signe —, selon que le plan coupe l'axe que l'on considère d'un côté par rapport à l'origine, ou bien du côté opposé. Mais, parce que les faces cristallines parallèles aux axes sont généralement celles qui se rencontrent le plus fréquemment dans les formes d'un minéral, il arrive que, dans les signes qui les représentent, le symbole ∞ se répète un grand nombre de fois, ce qui allonge beaucoup ces signes et produit un effet désagréable sur l'œil des personnes peu familières avec les conceptions mathématiques. Aussi a-t-on cherché de plusieurs manières à éviter l'emploi de ce symbole et à n'employer que des notations à caractéristiques finies.

Je ferai d'abord remarquer que dans les signes de Neumann, adoptés par MM. Frankenheim, Miller et Bravais, le coëfficient infini ∞ disparaît, et est remplacé partout par le coëfficient o. Dans le signe général $\left(\frac{1}{g}.a : \frac{1}{h}.b : \frac{1}{k}c\right)$, ou dans le signe le plus simple $[ghk]$ par lequel on le représente, les quantités g, h, k sont telles que leurs inverses $\frac{1}{g}, \frac{1}{h}, \frac{1}{k}$ sont proportionnelles aux coëfficients m, n, p du signe de Weiss. Il suit de là que, quand un de ces derniers coëfficients devient ∞, l'indice correspondant dans l'autre signe devient nécessairement o. Par exemple, le signe ($\infty a : 2b : 3c$) dans l'une des notations, a pour correspondant dans l'autre le signe [032] (1).

1) Pour passer du signe (mnp) au signe $[ghk]$, ou réciproquement, il suffit

Mais on peut éviter à la fois les indices ∞ et o, et n'avoir que des signes à caractéristiques finies et entières, en adoptant le système de notation imaginé par Haüy, et légèrement modifié par J. Brooke (1) et par A. Lévy (2). Des deux formes corrélatives (fig. 39, pl. III), l'une octaédrique ou bi-pyramidale, et l'autre prismatique, et parmi lesquelles on choisit ordinairement la forme fondamentale, celle qu'Haüy prend pour type ou forme primitive est le prisme dont les arêtes sont égales et parallèles aux axes *a*, *b*, *c* de l'octaèdre. Les faces de ce prisme correspondent aux sections principales de l'octaèdre, et sont par conséquent parallèles à deux des axes; dans la notation de Weiss, leurs signes cristallographiques contiendraient deux fois le symbole ∞ : Haüy dans ce cas évite l'emploi de ce symbole, en désignant ces trois plans fondamentaux par les lettres P, M, T, qui sont les initiales du mot *primitif*.

Le cas dans lequel une face secondaire serait parallèle à l'un des axes seulement, et où le symbole ∞ ne figurerait qu'une seule fois dans le signe, est celui d'une modification ou troncature simple, qui aurait eu lieu sur une des arêtes du prisme fondamental. Haüy désigne les diverses arêtes de ce prisme par les consonnes B, C, D, F, G, H, et les angles solides par les voyelles A, E, I, O, comme on le voit fig. 41, pl. III; une modification parallèle à l'arête D, qui couperait les arêtes B et G dans le rapport de 2 B à 3 G, serait représentée dans la notation de Weiss par le signe (∞ D : 2 B : 3 G) : Haüy dans ce cas échappe encore à la nécessité de recourir au symbole ∞, en prenant pour base de son signe la lettre D qui marque l'arête à laquelle la face est parallèle, et en plaçant à la droite de cette lettre, en manière d'exposant ou d'indice numérique, le nombre fractionnaire $\frac{2}{3}$, qui indique le rapport dans lequel cette face coupe les deux autres axes ou arêtes du prisme, B et G. Ainsi, dans la notation d'Haüy, le simple signe $D^{\frac{2}{3}}$ équivaut au signe plus compliqué (∞ D : 2 B : 3 G). MM. Brooke, Lévy et Dufrénoy ont adopté ce genre de notation : seulement, ces deux derniers minéralogistes

de chercher le plus petit multiple commun aux trois caractéristiques connues, et de le diviser successivement par chacune d'elles, pour avoir celles de l'autre signe.

(1) *A familiar Introduction to Crystallography*; in-8°, London, 1823.

(2) *Description d'une Collection de minéraux*; 3 vol. in-8°, avec Atlas; Londres, 1837.

emploient, au lieu de majuscules, les petites lettres correspondantes, pour désigner les facettes secondaires : dans leurs ouvrages, la face ci-dessus aurait pour signe $d^{2/3}$.

Reste maintenant le cas des modifications sur les angles, dans lequel la face secondaire coupe toujours à la fois, et à des distances finies, les trois axes ou les trois arêtes adjacentes B, D, G du prisme fondamental. Haüy le subdivise en deux autres : 1° celui dans lequel la face coupe *également*, c'est-à-dire suivant le même multiple, deux au moins des trois arêtes (c'est le cas de ses décroissements ordinaires sur les angles) ; et 2° celui où elle les coupe *inégalement* toutes les trois (*décroissements intermédiaires*). Le premier cas comporte une simplification analogue à celle de la modification sur les arêtes. Supposons une face qui coupe les trois arêtes de l'angle E aux distances 2 B, 2 D, 3 G : elle aurait pour signe, dans la notation de Weiss, (2 B : 2 D : 3 G) ; mais comme deux des indices sont égaux, et qu'il suffit de connaître le rapport de ces deux indices au troisième, Haüy, dans ce cas, donne pour base à son signe la lettre E, qui désigne l'angle tronqué, et place à sa droite la fraction $\frac{2}{3}$, indiquant le rapport suivant lequel la troncature a eu lieu. On a ainsi le signe très-simple $E^{2/3}$ ou $e^{2/3}$ selon Lévy et Dufrénoy. Le second cas ne comporte aucune simplification, et le signe ($B^m D^n G^p$) indique complètement la loi de troncature ou de génération de la face, aussi bien que le signe de Weiss (m B : n D : p G) dont il est l'équivalent manifeste (1).

§ 14. *Détermination cristallographique des dimensions des formes prismatiques.*

D'après ce qui a été dit des deux formes corrélatives représentées fig. 39, pl. III, il revient absolument au même de rapporter toutes les formes secondaires d'un système à un octaèdre, en comptant les paramètres sur les axes, ou de les rapporter au parallélipipède *tangent*, en comptant alors les paramètres sur les

(1) Le signe ($B^m D^n G^p$) n'est pas le signe théorique dont Haüy s'est servi pour marquer ce qu'il a appelé un décroissement intermédiaire. Mais il le connaissait, et, avec son consentement, j'en ai fait usage dans le second volume de sa *Cristallographie* (t. II, p. 228), comme en plusieurs endroits de la seconde édition de sa *Minéralogie*, sous le nom de *signes techniques*. Ils sont bien préférables aux signes théoriques correspondants, comme on en jugera par ce que j'en dirai plus loin, dans l'Exposé de la Théorie des décroissements.

arêtes. Les cristallographes allemands adoptent pour formes fondamentales, dans les différents systèmes, des formes octaédriques, ou plus généralement bi-pyramidales; et ils motivent cette préférence qu'ils leur accordent sur les formes prismatiques, en disant que les premières sont susceptibles d'une détermination complète et immédiate. Le rapport de leurs axes peut en effet se déduire trigonométriquement de la mesure de leurs angles dièdres. Haüy, et la plupart des cristallographes de son école, choisissent au contraire les parallélipipèdes, ou plus généralement les formes prismatiques : mais ils sont obligés, dans le plus grand nombre des cas, de déterminer *cristallographiquement* les dimensions linéaires du prisme dont ils ont fait choix, c'est-à-dire de les mettre en rapport avec celles d'une autre forme, telle qu'un octaèdre, dont la détermination ait pu se faire immédiatement. Or, si l'on a soin de régler les dimensions du parallélipipède fondamental sur celles d'un octaèdre correspondant, en considérant celui-ci comme inscrit dans le parallélipipède, les lois de dérivation des faces secondaires seront exactement les mêmes à l'égard de l'une ou de l'autre forme : ce sera donc comme si l'on avait pris l'octaèdre pour point de départ. C'est là précisément ce que fait Haüy, lorsqu'il a à déterminer les dimensions d'un prisme quadrangulaire, choisi par lui comme forme primitive. Toujours il fait en sorte que ces dimensions a, b, c soient les valeurs mêmes des paramètres de certaines faces secondaires appartenant à un octaèdre; c'est-à-dire que ces faces secondaires, rapportées au parallélipipède dont les arêtes sont a, b, c, doivent en dériver par la loi la plus simple de toutes (celle dont les indices égalent l'unité), et par conséquent avoir pour signe $(a:b:c)$; or, elles auraient aussi le même signe, si on les rapportait à l'octaèdre inscrit, dont les axes sont a, b, c; et ce signe $(a:b:c)$ étant précisément la notation des faces de cet octaèdre, il y a donc identité entre ces dernières et les faces secondaires qui ont servi à déterminer les dimensions a, b, c.

Ainsi, lorsqu'on a recours à la considération de certaines faces secondaires, pour déterminer les dimensions linéaires d'un prisme fondamental, c'est comme si l'on prenait pour point de départ du système l'octaèdre dont ces faces font partie; et par conséquent, on voit que le cas des formes primitives prismatiques se trouve ainsi ramené à celui des formes octaédriques, où le calcul des dimensions linéaires ne peut donner lieu à aucune difficulté.

Lorsqu'à l'exemple d'Haüy, on opère les sections paramétriques $o'a'$, $o'b'$, $o'c'$ (fig. 40), sur les arêtes des formes fondamentales, elles déterminent alors la position d'un plan secondaire $a'b'c'$ qui aurait abattu ou tronqué l'angle solide o', et que l'on peut considérer par conséquent comme une *troncature* faite sur cet angle. La loi de dérivation des faces cristallines est donc la loi qui détermine ces plans de troncature, par lesquels s'opère le passage d'une forme à une autre : elle n'est que *la loi des troncatures* elles-mêmes, et pourrait par conséquent recevoir cette dénomination. On verra plus loin pourquoi Haüy a cru devoir la désigner par le nom de *loi des décroissements*.

§ 15. *Preuves de la réalité de la seconde loi de la cristallisation.*

Dans ce qui précède, nous nous sommes bornés à exposer la loi d'après laquelle ont lieu toutes les dérivations de faces secondaires, sans rien dire des preuves qui en établissent la réalité. Cette loi peut se démontrer de deux manières :

1° *A priori*, et indépendamment de toute vérification expérimentale. Cette loi en effet n'est qu'une conséquence naturelle de cette structure en réseau, qui caractérise essentiellement la cristallisation, et qui est elle-même le résultat nécessaire des faits bien connus de l'accroissement et du clivage, combinés avec l'hypothèse atomistique. D'après ce mode de structure, les trois axes ou lignes fondamentales du réseau OA, OB et OC, fig. 42, pl. III, ne sont que des files moléculaires, dans chacune d'elles les centres des molécules sont également distants; et si l'on nomme a la distance moléculaire sur l'axe OA; b et c, les distances moléculaires sur les axes OB, OC, toute face terminale oblique, telle que $\alpha\beta\gamma$, devra nécessairement passer par trois molécules α, β, γ, prises respectivement sur ces trois axes; chaque segment ou paramètre sera donc un multiple de l'intervalle moléculaire qui correspond à l'axe auquel il appartient; et si, pour une certaine face, le paramètre compté sur l'axe OA est égal à $2a$, et pour une autre face à $3a$, le rapport des deux paramètres correspondants sera égal à $\frac{2a}{3a}$, ou à $\frac{2}{3}$, par conséquent rationnel. Nous reviendrons sur ce genre de démonstration à l'article où nous traiterons spécialement de la structure cristalline, et de la théorie des décroissements qui s'y rattache : on y verra

que la condition des caractéristiques entières n'est que la traduction purement géométrique du fait et de la loi physiques des décroissements moléculaires.

2° *A posteriori*, par la vérification qu'on peut en faire très-aisément pour un grand nombre de cas, et par l'accord qui ne s'est jamais démenti jusqu'à présent entre les résultats que le calcul en déduit, et ceux que donne l'expérience. Ce genre de preuves étant le seul qu'il nous soit permis de faire valoir en ce moment, nous croyons devoir entrer dans quelques détails à ce sujet.

La loi cristallographique, suivant laquelle les paramètres qui déterminent la position des faces cristallines sont toujours des multiples ou sous-multiples simples de certaines longueurs ou proportions normales, a la plus grande analogie avec la loi chimique des combinaisons en proportions définies : elle peut se vérifier de la même manière. En chimie, on constate la loi des proportions multiples, en comparant entre elles les diverses combinaisons de deux éléments, dans lesquelles un de ces éléments entre toujours pour la même quantité : on trouve alors que les proportions variables du second élément sont toujours des multiples de l'une d'entre elles, par les nombres les plus simples $\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{2}$, 2, 3, 4, 5..... De même, en cristallographie, on peut se proposer de comparer entre elles, sous le rapport de leur troisième paramètre, a, a' a''.... des faces qui auraient les deux autres paramètres b et c communs, comme on le voit fig. 43, pour les ABC, A'B'C', A"B"C"..., etc. (D'après la définition que nous avons donnée du mot *zone*, pag. 44, il est évident que toutes ces faces font partie d'une même zone, dont la direction est marquée par la ligne BC.) Eh bien! si d'après les mesures des incidences de ces diverses faces sur le plan commun yoz, on calcule les valeurs numériques des paramètres oA, oA' oA"....., on trouvera que ces valeurs sont aussi des multiples de l'une d'entre elles par des nombres entiers ou fractionnaires très-simples, et qu'ainsi le troisième paramètre est généralement de la forme ma. Ce que nous avons dit des faces qui avaient deux paramètres communs b et c, peut se dire également de celles dont les signes s'accorderaient par deux autres paramètres quelconques, a et c, ou bien a et b; le paramètre variable serait toujours représenté par nb, ou par pc. L'exemple que nous citons nous paraît suffisant pour montrer comment on peut se convaincre de l'existence de la loi des troncatures.

L'énoncé de cette loi comprend deux conditions distinctes : la *rationnalité* des indices de dérivation ou des coëfficients paramétriques, et la *simplicité* de leurs valeurs numériques. La première partie de cet énoncé est susceptible de deux genres de démonstration, l'un théorique et l'autre expérimental ; la seconde partie, celle qui concerne la simplicité des indices, ne saurait être que le résultat général des observations faites jusqu'à ce moment sur tous les cristaux connus. Pour donner ici une idée de cette simplicité, nous dirons que lorsque les signes des faces cristallines sont mis sous l'une des deux formes $(ma:nb:pc)$ ou $\left(\frac{1}{g}a:\frac{1}{h}b:\frac{1}{k}c\right)$, les indices m,n,p, ou g,h,k ont le plus souvent pour valeurs les nombres les plus simples 1, 2, 3, 4, 5..., et que celles de ces valeurs qui dépassent les nombres d'un seul chiffre s'observent très-rarement.

L'importance de la loi des troncatures rationnelles est facile à comprendre. D'après cette loi, il suffit de connaître un *seul* plan $(a:b:c)$ d'un système cristallin, ainsi que les angles que font entre eux les axes sur lesquels sont pris les paramètres a,b,c, pour être en état de calculer *les autres* plans du système, tous compris dans le signe général $(ma:nb:pc)$, où l'on peut ne donner à m,n,p que des valeurs entières ; et comme dans la nature ces valeurs ne dépassent guère les nombres d'un seul chiffre, on est sûr, en essayant successivement les combinaisons des nombres *les plus simples*, de pouvoir connaître et calculer d'avance toutes les faces, et par conséquent aussi toutes les formes qui pourront s'offrir à nos observations.

Il faut remarquer que les mêmes paramètres peuvent être comptés sur les axes de l'octaèdre, ou sur les arêtes du parallélipipède tangent, de huit manières différentes, en sorte qu'il y a huit plans différents, qui sont déterminés par des paramètres de valeur égale, et qu'on peut appeler à cause de cela faces *isoparamétriques*. En effet, on peut prendre ces paramètres sur les demi-axes, qui composent un quelconque des huit angles trièdres formés autour du centre, ou bien sur les trois arêtes particulières qui composent un quelconque des huit angles solides du parallélipipède. Or, selon que la dérivation a lieu sur un de ces angles ou sur un autre, la direction du plan secondaire varie. Il faut donc avoir soin d'indiquer à l'avance celui des huit angles sur lesquels on doit compter les paramètres. On peut faire en sorte que cette indication soit contenue dans le signe lui-

même, et pour cela il suffit d'avoir recours à l'expédient dont on se sert en géométrie analytique, qui est de donner aux quantités qui se comptent à partir d'un centre, sur deux demi-axes opposés, les signes contraires + et —. Par exemple, on conviendra de donner le signe + à tous les paramètres qui seront mesurés sur les trois demi-axes ox, oy, oz, fig. 40, et le signe — à ceux qui seront mesurés sur les demi-axes ox', oy', oz'. Il résulte de là que les huit faces, qui sont déterminées par les mêmes paramètres (abstraction faite des signes + et —) et qui appartiennent à un même octaèdre, auront chacune un signe distinct, lorsque ces paramètres seront regardés comme pouvant être positifs ou négatifs. Ces huit signes particuliers sont :

$(ma:nb:pc)$		$(-ma:-nb:-pc)$
$(ma:-nb:pc)$	et	$(-ma:nb:-pc)$
$(-ma:nb:pc)$		$(ma:-nb:-pc)$
$(-ma:-nb:pc)$		$(ma:nb:-pc)$.

Les faces opposées et parallèles ont des paramètres égaux et des signes contraires. — Ces huit signes peuvent se réunir en un seul signe complexe $(\pm ma:\pm nb:\pm pc)$, qui représente alors un octaèdre, une forme simple tout entière.

CHAPITRE IV.

ÉTUDE DES SYSTÈMES CRISTALLINS.

Dans les chapitres qui précèdent, nous avons établi plusieurs faits d'observation, concernant l'étude des cristaux, et entre autres, ceux que nous allons rappeler ici, parce qu'ils vont nous donner lieu de résoudre un problème annoncé ci-dessus, et qui est de la plus haute importance en cristallographie.

L'un de ces faits consiste dans la diversité des formes dont chaque espèce minérale est susceptible; le second, dans cette relation remarquable qui existe constamment entre les différentes formes de la même substance, et qui est telle, que l'une quelconque de ces formes peut passer à toutes les autres par des modifications symétriques, dont nous avons fait connaître la loi avec beaucoup de détail (p. 80).

Une première conséquence de ces résultats, est que le nombre

des formes simples, de genres différents, qui peuvent se rencontrer dans un même minéral, est nécessairement limité. On se souvient que par formes de genres différents, nous devons entendre ici, non pas celles qui ne différeraient que par la valeur des angles, toutes choses égales d'ailleurs (car on peut considérer celles-ci comme étant de même genre), mais bien celles qui se distinguent entre elles par le nombre et l'assortiment de leurs faces. Or, ces dernières ne sauraient surpasser en nombre les combinaisons diverses de facettes, par lesquelles l'une d'entre elles peut se modifier, conformément aux règles prescrites par la loi de symétrie.

Une autre conséquence des faits dont nous avons parlé, c'est qu'étant donnée l'une de ces formes, il est possible d'en déduire toutes les autres par un procédé simple et purement géométrique, consistant à modifier la forme prise pour point de départ, successivement sur chacune de ses espèces d'angles ou d'arêtes, par des facettes symétriques, qu'il suffit ensuite de prolonger par la pensée jusqu'à ce qu'elles s'entrecoupent, pour avoir une des formes cherchées. Or, si l'on a soin de ne modifier chaque partie du solide fondamental que conformément à ce qu'exige la symétrie, de répéter chaque modification sur toutes les parties de même espèce, c'est-à-dire de même valeur cristallographique, et d'épuiser enfin toutes les combinaisons de facettes modifiantes qui sont possibles, on sera sûr d'obtenir ainsi toutes les formes que l'on veut déterminer, sans en omettre une seule.

On comprend sous le nom de *système cristallin*, toutes les formes qui peuvent ainsi se déduire les unes des autres, et qui peuvent se rencontrer toutes dans une même espèce minérale, dès que l'on y observe l'une d'entre elles. Celle que l'on choisit pour base du système se nomme *type*, *noyau*, *forme fondamentale* ou *primitive;* toutes celles auxquelles conduit le procédé de dérivation s'appellent *formes dérivées* ou *secondaires*. Le choix de la forme fondamentale est d'ailleurs tout-à-fait arbitraire; car les formes appartenant au même système ayant toutes le même caractère de symétrie, chacune d'elles doit pouvoir reproduire toutes les autres. Par conséquent, dans la solution du problème qui va nous occuper maintenant, et qui aura pour objet de développer l'un après l'autre tous les systèmes cristallins de la nature, en supposant donnée une forme de chacun d'eux, il sera indifférent de prendre pour point de départ telle forme plutôt que telle autre. On choisit ordinairement l'une des plus simples,

parmi les formes prismatiques ou pyramidales. Nous adopterons en général, dans l'exposé suivant, les formes prismatiques, qui se réduisent presque toutes aux diverses espèces du parallélipipède.

Tous les systèmes cristallins connus peuvent se ramener à six types généraux, qui sont : le *cube* (ou parallélipipède régulier), le *prisme hexagonal régulier*, le *prisme carré droit*, le *prisme rectangle droit*, le *prisme rectangle oblique*, et le *prisme obliquangle à base oblique* (ou parallélipipède irrégulier). Il y a donc six genres différents de systèmes cristallins; mais, dans quelques-uns de ces genres, il y a lieu de distinguer plusieurs espèces distinctes de système, ce qui porte le nombre total des systèmes particuliers à près du double. Cela tient, comme nous l'avons déjà dit, à ce que le même type géométrique, pris pour forme fondamentale dans des substances différentes, ne présente pas toujours le même caractère de symétrie dans ses modifications; tantôt la modification atteint toutes les parties qui sont de même valeur géométrique, et tantôt elle ne se répète que sur un certain nombre de ces parties (la moitié ou le quart ordinairement), les autres, quoique géométriquement égales aux premières, se comportant comme si elles étaient physiquement différentes. Le même solide fondamental peut donc présenter dans diverses espèces minérales, différents degrés de symétrie, dont chacun détermine un système à part. Le plus haut degré de symétrie, ou la symétrie la plus complète, a lieu lorsque toutes les parties du solide, qui sont géométriquement égales, se modifient à la fois; c'est le cas que l'on observe le plus fréquemment dans la nature, et il constituera pour nous le système cristallin principal ou ordinaire, dans le genre ou groupe de systèmes du même type géométrique. Les formes dérivées se composent alors du plus grand nombre possible de facettes modifiantes : on les appelle dans ce cas formes *holoédriques*. Dans le degré suivant, la moitié seulement du nombre total de facettes que donne le cas précédent, se montre sur certaines formes dérivées, qui prennent à cause de cela le nom de formes *hémiédriques*. Dans un troisième degré, c'est seulement le quart du nombre ordinaire des faces qui se produit, et les formes que l'on obtient dans ce cas se nomment formes *tétartoédriques*. Ces degrés inférieurs de symétrie constitueront pour nous des systèmes secondaires, ou des sous-systèmes à l'égard du système principal.

PREMIER GENRE.

SYSTÈMES CUBIQUES OU RÉGULIERS.

CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUE DES AXES.

TROIS AXES ÉGAUX ET RECTANGULAIRES.

Il y a trois systèmes cristallins, qui ont pour forme fondamentale un cube, savoir : 1° le système cubique à modifications holoédriques (systéme cubique principal, ou proprement dit); 2° le système cubique à modifications hémiédriques, dont les faces sont toutes inclinées entre elles (système du tétraèdre régulier, ou système tétraédrique); et 3° le système cubique à modifications hémiédriques, dont les faces sont parallèles deux à deux (système du dodécaèdre pentagonal, ou systéme hexa-diédrique (1).

Les formes comprises dans l'un quelconque de ces trois systèmes n'ont pas le même caractère de symétrie, et, par suite, ne se modifient pas de la même manière que celles des deux autres systèmes; mais les formes des trois systèmes ont pour caractère commun, d'avoir trois axes rectangulaires de même espèce, c'est-à-dire égaux entre eux. Nous représenterons par *a* la longueur commune de ces trois axes.

I. SYSTÈME CUBIQUE PROPREMENT DIT.

CARACTÈRE PHYSIQUE DES AXES.

TROIS AXES ISOPOLAIRES ET QUADRILATÉRAUX (A^4).

Le système cubique proprement dit, ou à modifications toutes holoédriques, ne se compose que de sept formes simples, le cube compris; car cette dernière forme n'est susceptible que de six espèces de modifications, savoir : deux sur les arêtes, et quatre sur les angles solides.

La figure 1, pl. IV, représente le cube ou la forme fondamentale, avec la notation qui convient à la symétrie du système.

(1) D'après les règles de la nomenclature par les facteurs, que nous avons adoptées (voyez p. 38), le dodécaèdre pentagonal peut être nommé *hexa-diédre*, et, par conséquent, le système dont il fait partie, *système hexa-diédrique*.

La notation qui est relative à ses faces, quand on les rapporte aux trois axes égaux et rectangulaires a, est, d'après Weiss, $a : \infty a : \infty a$, le signe ∞ de l'infini indiquant le parallélisme de la face avec celui des axes, devant lequel il est placé. D'après la notation française d'Haüy et de Lévy, chaque face est représentée par P, comme on le voit figure 2. Le cube ayant ici tous ses angles identiques, ainsi que toutes ses arêtes, la modification qui se produira sur l'un quelconque des angles ou des bords, devra se répéter sur tous les autres.

Le cube peut être modifié sur les arêtes : 1° *par une seule facette,* qui devra s'incliner également sur les deux faces adjacentes, puisque tout est semblable à droite et à gauche de chaque arête. Les arêtes étant au nombre de douze, on aura ainsi (fig. 3) douze facettes, qui étant prolongées jusqu'à s'entrecouper mutuellement, produiront le *dodécaèdre rhomboïdal* (fig. 4), ou *rhombo-dodécaèdre*. Ce dodécaèdre est formé de douze rhombes égaux; toutes ses arêtes, au nombre de vingt-quatre, sont égales, et l'angle dièdre, entre deux faces quelconques qui se rencontrent sur une arête, est de 120°. Les rhombes des faces ont des angles de 109° 28', et 70° 32'. Chacune de ces faces est parallèle à l'un des axes a, et coupe les deux autres dans le rapport de 1 à 1. Sa notation est donc $(a : a : \infty a)$, ou plus simplement b^1. Il y a six angles solides A d'une espèce, et huit angles O d'une autre espèce.

2° *Par deux facettes*, également inclinées de part et d'autre de chaque arête sur les faces voisines (fig. 5). Toutes ces facettes réunies étant au nombre de vingt-quatre, donnent naissance à un solide à vingt-quatre triangles isoscèles égaux, qui a la forme d'un cube recouvert sur toutes ses faces de pyramides surbaissées (fig. 6). C'est le *cube pyramidé* de plusieurs cristallographes. Nous le nommerons *hexa-tétraèdre*, parce que son caractère distinctif est d'avoir ses vingt-quatre faces partagées en 6 groupes pyramidaux de quatre faces.

Chaque face l'hexa-tétraèdre est parallèle à l'un des trois axes, mais elle ne coupe pas les deux autres dans le même rapport. Sa notation, exprimée de la manière la plus simple et la plus générale, au moyen d'indices entiers ou fractionnaires, est, selon Weiss $(a : m a : \infty a)$, ou, selon Lévy, b^m. On en connaît plusieurs espèces. Celle qui est donnée par la loi la plus simple b^2 se rencontre le plus fréquemment, sans doute à cause de la simplicité de sa dérivation. Cette forme se présente isolée dans l'Or et dans

le cuivre natif. Elle se distingue encore des autres par une particularité remarquable : c'est que les arêtes F et G sont également obtuses, tandis que dans tous les autres solides du même genre, elles diffèrent par leur valeur. L'angle dièdre des deux faces qui forment les arêtes F, correspondantes à celles du cube, est donc le même que celui des deux faces qui se rencontrent en G, et par suite les angles solides hexaèdres, qui répondent à ceux du cube, sont réguliers. Les angles dièdres en F et en G sont de 143° 8'.

Après celui dont nous venons de parler, l'hexa-tétraèdre qui se présente le plus souvent a pour signe b_3. On le rencontre isolé dans la fluorine d'Angleterre. Il a aussi un caractère particulier : c'est que l'angle de deux faces opposées dans chacune de ses pyramides tétraèdres est égal à ce même angle de 143° 8', que nous avons trouvé dans le précédent. On connait encore une troisième espèce d'hexa-tétraèdre, dont la notation est $b^{3/2}$; et deux autres, dont les signes sont un peu moins simples.

Le cube peut être modifié sur les angles : 1° *par une seule facette*, également inclinée sur les trois faces qui composent l'angle (fig. 7). Cette modification conduit à l'*octaèdre régulier* (fig. 8), dont les angles dièdres sont de 109° 28' 16". Ceux des faces opposées sur chaque pyramide sont de 70° 31' 44".

2° *Par trois facettes, tournées vers les faces du cube* (fig. 9). La forme dérivée (fig. 10) est un solide à vingt-quatre faces égales, qui sont des trapézoïdes symétriques; on la nomme à cause de cela *trapézoèdre*. Ce solide a quarante-huit arêtes de deux espèces, vingt-quatre longues G, et vingt-quatre courtes F; il a vingt-six angles solides, six angles réguliers A, correspondant par leur position aux angles de l'octaèdre, et composés de quatre faces; huit angles réguliers O, correspondant aux angles du cube, et composés chacun de trois faces; et enfin douze angles symétriques E, correspondant aux centres des faces du rhombododécaèdre. Chaque face du trapézoèdre coupe également deux des trois axes a, et inégalement le troisième : sa notation est, d'après Weiss ($ma : ma : a$), ou, selon Lévy, a^m, la lettre a étant ici pour l'angle A de la forme primitive. Parmi tous les trapézoèdres existants ou possibles, et qui diffèrent entre eux par les valeurs de leurs angles, il en est un qui se rencontre plus fréquemment que les autres, parce qu'il a le rapport le plus simple avec le dodécaèdre rhomboïdal. C'est celui que l'on a représenté fig. 10, et que donne ce dodécaèdre, lorsqu'il est modifié

par une facette tangente sur toutes ses arêtes. Il a pour signe $(2a:2a:a)$, ou a^2. Quelques cristallographes le désignent par le nom de *leucitoèdre*, parce qu'il est la forme la plus ordinaire de l'espèce minérale appelée *leucite* ou *amphigène*. Il est aussi très-commun dans le grenat et l'analcime. L'inclinaison des faces qui forment les arêtes G est de 131° 49', et celle des faces qui forment les arêtes F, de 146° 27'. L'inclinaison de deux faces opposées, dans l'angle solide A, est de 109° 28' (angle des faces de l'octaèdre); et celle de deux arêtes opposées, sur le même angle solide, est de 126° 52' (valeur d'angle que nous retrouverons dans le dodécaèdre pentagonal de la pyrite). Avec ce trapézoèdre, celui qu'on observe le plus souvent a pour notation $(3a:3a:a)$. Il est commun dans la fluorine, le fer aimant, l'or et l'argent natifs. On lui a donné le nom particulier de *leucitoïde*.

3° *Par trois facettes, tournées vers les arêtes du cube* (fig. 11, pl. IV). La forme dérivée (fig. 12) est un solide à vingt-quatre triangles isoscèles égaux, qui offre l'aspect d'un octaèdre recouvert sur ses faces, de pyramides surbaissées. C'est l'*octaèdre pyramidé* de plusieurs cristallographes. Nous le nommerons *octa-trièdre*, parce que son caractère distinctif est d'avoir ses vingt-quatre faces partagées en huit groupes pyramidaux de trois faces. Il y a deux espèces d'arêtes, 12 plus longues F, et 24 plus courtes G. Les angles solides sont aussi de deux espèces : six angles symétriques A à 8 faces, et huit angles trièdres réguliers O. La notation générale des faces est selon Weiss, $(a:a:ma)$, et selon Haüy et Lévy, $a^{\frac{1}{m}}$.

On connaît trois espèces d'octa-trièdre, dont les signes sont : $a^{\frac{1}{2}}$, $a^{\frac{1}{3}}$, et $a^{\frac{2}{3}}$. Dans la première espèce, les droites qui partagent en deux parties symétriques les faces triangulaires, sont situées comme les arêtes F du premier trapézoèdre (ou leucitoèdre); dans la seconde espèce, les droites correspondantes sont situées comme les arêtes F du leucitoïde ou second trapézoèdre. Dans l'octa-trièdre $a^{1/2}$, l'angle dièdre en F est 141° 3'; l'angle en G, de 152° 44'. Dans le second solide, les angles correspondants ont pour valeurs 153° 28', et 142° 8'.

4° *Par six facettes*, placées deux par deux symétriquement au-dessus de chaque arête ou de chaque face de l'angle solide (fig. 13). La forme dérivée (fig. 14) est un solide à quarante-huit faces égales, qui sont toujours des triangles scalènes. Un des caractères de cette forme étant d'avoir douze angles solides

égaux, composés chacun de quatre faces, on peut la désigner par le nom de *dodéca-tétraèdre*; ou bien, l'appeler *scalénoèdre*, à raison de la figure de ses faces.

Dans ce scalénoèdre, il y a quarante-huit faces, soixante-douze arêtes, et vingt-six angles solides. Les angles solides sont de trois espèces : six angles A, symétriques, à 8 faces, et qui correspondent aux angles de l'octaèdre régulier; huit angles O symétriques, à 6 faces, et qui répondent aux angles du cube; et enfin douze angles à 4 faces et symétriques, correspondant aux angles E du trapézoèdre ou au milieu des faces du rhombo-dodécaèdre.

Les arêtes sont aussi de trois espèces : vingt-quatre arêtes H, qui vont par couple d'un angle A à un autre angle A; vingt-quatre arêtes F, qui s'étendent de même par couple entre les angles O; et vingt-quatre arêtes G, allant des angles O aux angles A.

Dans les différentes espèces de dodéca-tétraèdre, on voit tantôt les angles octaédriques A, et tantôt les angles hexaédriques O prédominer ou devenir plus saillants, de sorte que dans la forme générale le cristal rappelle ou l'aspect de l'octaèdre, ou celui du cube. Dans certains cas, il arrive que les arêtes G ont exactement la même position que les arêtes du rhombo-dodécaèdre, et alors c'est la forme de ce dodécaèdre qui devient dominante; et le solide peut, dans ces cas, être considéré comme un dodécaèdre pyramidé.

La notation générale des faces au moyen d'indices entiers ou fractionnaires, est $\left(a : \frac{1}{m} a : \frac{1}{n} a\right)$, ou bien $(b^1 b^{\frac{1}{m}} b^{\frac{1}{n}})$. On connaît plusieurs espèces de ces solides, entre autres celles qui ont pour signes $\left(a : \frac{1}{2} a : \frac{1}{3} a\right)$, $\left(a : \frac{1}{3} a : \frac{1}{4} a\right)$ et $\left(a : \frac{1}{2} a : \frac{1}{4} a\right)$.

On a dans ces trois solides, pour les inclinaisons des faces qui se coupent dans les arêtes

	H.	F.	G.
$\left(a : \frac{1}{2} a : \frac{1}{3} a\right)$	— 149° 0'	— 158° 13'	— 158° 13'.
$\left(a : \frac{1}{3} a : \frac{1}{4} a\right)$	— 157° 23'	— 164° 3'	— 147° 48'.
$\left(a : \frac{1}{2} a : \frac{1}{4} a\right)$	— 154° 47'	— 144° 3'	— 162° 15'.

Les deux premiers sont des dodécaèdres pyramidés, c'est-à-dire que chez eux les arêtes G ont la même position relative que les arêtes du dodécaèdre. Il suit de là que le trapézoèdre ordinaire, qui dérive du dodécaèdre par une troncature tangente sur les arêtes, peut aussi dériver de ces deux scalénoèdres par une semblable troncature opérée sur les arêtes G seulement. Ils se rencontrent tous deux dans le grenat, mais seulement en combinaison avec le dodécaèdre et le trapézoèdre.

Le premier se distingue encore de tous les autres en ce que les angles dièdres, correspondant aux arêtes F et G ont la même valeur, comme on le voit ci-dessus; il en résulte que les angles hexaédriques O, de symétriques qu'ils sont généralement, deviennent alors réguliers; mais c'est là une circonstance toute particulière au premier solide, et qui ne se retrouve plus dans le second, bien que celui-ci soit encore un dodécaèdre pyramidé. Le troisième solide, et quelques autres espèces que nous ne citons pas ici, ont été observés dans la fluorine.

Telles sont donc les sept formes simples dont se compose le système cubique à modifications holoédriques : le *cube*, le *dodécaèdre rhomboïdal*, l'*hexa-tétraèdre*, l'*octaèdre régulier*, le *trapézoèdre*, l'*octa-trièdre*, et le *dodéca-tétraèdre*. Il est bon de rappeler ici que ces formes simples ne sont que les éléments du système, et que par leur combinaison entre elles deux à deux, trois à trois, quatre à quatre, etc., elles peuvent produire des formes composées de différents genres, et dont le nombre est considérable. Mais ces formes composées, offrant un assortiment de plusieurs ordres de facettes faciles à distinguer, et dont chacun appartient à une forme élémentaire, peuvent toujours se résoudre en un petit nombre de formes simples, de sorte qu'on est constamment ramené à ces éléments du système, lorsqu'il s'agit de décrire un cristal complexe.

Nous avons dit que le choix de la forme fondamentale est tout-à-fait arbitraire; il ne sera pas inutile de faire voir par un exemple, que l'on arriverait aux mêmes résultats, en prenant pour point de départ, une autre forme que le cube. Admettons que la forme fondamentale soit l'octaèdre régulier : cet octaèdre sera, comme le cube, susceptible d'être modifié de six manières différentes, savoir : de deux manières sur les arêtes, et de quatre sur les angles solides. Il pourra être modifié sur les arêtes : 1° par une facette également inclinée sur les faces adjacentes (fig. 15); cette modification reproduira le dodécaèdre rhomboïdal (fig. 4);

2° par deux facettes également inclinées, l'une à droite, et l'autre à gauche de l'arète (fig. 16), ce qui mènera à l'octa-trièdre, fig. 12. Il pourra être modifié sur les angles : 1° par une seule facette symétrique (fig. 17); forme dérivée : le cube; 2° par quatre facettes tournées vers les faces octaédriques (fig. 18); forme dérivée : le trapézoèdre (fig. 10); 3° par quatre facettes correspondantes aux arètes (fig. 19); forme dérivée : l'hexa-tétraèdre (fig. 6); 4° par huit facettes, placées deux par deux au-dessus de chaque face de l'angle solide (fig. 20); forme dérivée : le dodéca-tétraèdre.

Si l'on adoptait pour forme fondamentale le dodécaèdre rhomboïdal (fig. 4), il faudrait d'abord remarquer que toutes ses arêtes, au nombre de vingt-quatre, sont identiques, mais qu'il a deux espèces d'angles solides, savoir : six angles solides à quatre faces ou tétraèdres, et huit angles solides à trois faces ou trièdres. Les arêtes pourront être modifiées de deux manières différentes, comme celles des solides précédemment examinés, et chaque sorte d'angle comportera quatre espèces de modifications, ce qui fera en tout dix; mais le nombre des formes dérivées de genre différent se réduira à six, parce que plusieurs modifications reproduiront le même solide. La modification par une facette sur les arêtes (fig. 21, pl. V), donnera le plus simple de tous les trapézoèdres, que la cristallisation puisse produire, celui que l'on rencontre si communément dans le grenat et dans l'amphigène. La modification par une facette sur les angles trièdres (fig. 22) donnera l'octaèdre régulier; une modification analogue sur les angles tétraèdres donnerait le cube, etc.

Le nombre des espèces minérales dont les formes se rapportent au système cubique ordinaire ou à modifications toujours holoédriques, est de plus de cinquante. Nous citerons pour exemples le sel marin, l'alun, le sel ammoniac, le diamant, le spinelle, le grenat, la fluorine, l'or, l'argent, le platine, le cuivre, la galène, le fer aimant, etc.

2. SYSTÈME TÉTRAÉDRIQUE.

Système cubique, à modifications anti-hémiédriques.

CARACTÈRE PHYSIQUE DES AXES.

TROIS AXES RECTANGULAIRES, ISOPOLAIRES ET QUADRILATÉRAUX, A COTÉS ALTERNES ($2A^2$). FORME REPRÉSENTATIVE DE LA MOLÉCULE : LE TÉTRAÈDRE RÉGULIER. (*Voyez* fig. 19, pl. I.)

Dans ce système, les modifications qui ont lieu sur le cube, considéré comme forme fondamentale, sont les mêmes que précédemment, en ce qui concerne les arêtes; mais le nombre des facettes qui se produisent sur les angles est réduit de moitié, parce que les huit angles solides, quoique géométriquement égaux, ne sont physiquement identiques que quatre à quatre, les angles opposés diagonalement étant de valeur différente. La notation qui répond à cette espèce de symétrie est celle que l'on voit fig. 23, où la lettre A désigne les angles d'une espèce, et la lettre *a* ceux de l'autre espèce. Les diagonales AA et *aa* d'une même face, quoique d'égale longueur, n'ont pas la même valeur physique, parce qu'elles aboutissent à des angles différents; aussi remarque-t-on que les cristaux cubiques, qui appartiennent à ce système, sont quelquefois striés diagonalement, et seulement dans le sens des diagonales d'une même espèce, comme on le voit fig. 28.

Les deux modifications sur les arêtes du cube, fig. 23, donneront les figures 4 et 6 du système précédent, c'est-à-dire le dodécaèdre rhomboïdal et l'hexa-tétraèdre.

Quant aux modifications sur les angles, il faut considérer à part celles qui peuvent avoir lieu sur les angles A, et celles qui peuvent se produire sur les angles *a*.

Le cube fig. 23 peut être modifié sur chacun des angles A: 1° *par une seule facette*, comme on le voit fig. 24; cette modification produira quatre faces, qui, prolongées jusqu'à s'entrecouper, donneront le *tétraèdre régulier* (fig. 26), forme hémiédrique à l'égard de l'octaèdre régulier. Ses angles dièdres sont de 70°32'.

2° *Par trois facettes tournées vers les faces du cube :* la modification totale sera représentée par la figure 9, moins les groupes de

facettes qui répondent aux angles *a*; et par conséquent la forme simple résultante sera une forme hémiédrique du trapézoèdre (fig. 10). Cette forme, que l'on voit fig. 36, est composée de douze triangles égaux et isoscèles; elle ressemble à un tétraèdre dont les faces seraient surmontées de pyramides droites triangulaires (tétraèdre pyramidé); et parce que ces douze triangles se partagent visiblement en quatre groupes semblables et symétriques, chacun de trois triangles, nous donnons à cette forme le nom de *tétra-trièdre*.

On connaît deux espèces de tétra-trièdre, qui dérivent des deux trapézoèdres les plus simples et les plus ordinaires, savoir: du leucitoèdre ($2a : 2a : a$), et du leucitoïde ou second trapézoèdre ($3a : 3a : a$). Voyez ci-dessus page 114. Les inclinaisons de leurs faces sont: dans le premier, 109° 28' et 146° 27; et dans le second, 129° 31' pour les deux espèces d'arêtes solides. Ce dernier est donc remarquable par cette particularité, que ses angles solides à six faces sont des angles réguliers. Le premier tétratrièdre existe seul dans le cuivre gris de Clausthal; le second ne se rencontre qu'en combinaison, dans les cristaux de blende de Kapnick, en Hongrie.

3° *Par trois facettes tournées vers les arêtes:* il faudra, pour se représenter cette modification, supprimer dans la figure 11 les groupes de facettes qui répondent aux angles *a*. La forme résultante sera donc l'octa-trièdre (fig. 12) réduit à la moitié du nombre de ses faces, ou le solide représenté fig. 34, et qui est un *dodécaèdre trapézoïdal*, un trapézoèdre à douze faces.

Ce solide a deux espèces d'arêtes: douze plus aiguës et plus longues X, et douze plus obtuses et plus courtes Y. Les angles solides sont de trois sortes. On ne connaît jusqu'à présent qu'un seul trapézoèdre de ce genre, et c'est celui qui dérive par hémiédrie du troisième des octa-trièdres cités page 114, savoir: de l'octa-trièdre, dont le signe est ($2a : 2a : 3a$). Il ne s'est point encore présenté isolément, mais en combinaison, dans les cristaux de cuivre gris de Dillenburg.

4° *Par six facettes sur les angles:* cette modification donnera *la moitié* du dodéca-tétraèdre (fig. 14), ou le solide représenté fig. 38; ce solide, composé de vingt-quatre triangles scalènes, qui forment quatre angles solides hexaèdres, portera le nom de *tétrahexaèdre*. C'est le scalénoèdre du système tétraédrique.

Les arêtes de ce solide sont de trois sortes, ainsi que les angles. On ne connaît jusqu'à présent que deux espèces de tétra-

hexaedre, savoir : celles qui dériveraient par hémiédrie des dodéca-tétraèdres dont les signes sont : $\left(a : \frac{1}{2} a : \frac{1}{3} a\right)$, et $\left(a : \frac{1}{3} a : \frac{1}{5} a\right)$. Ces deux espèces sont caractérisées par cette propriété, que les angles dièdres en Y et en Z (fig. 38) sont égaux, et par suite, que les angles solides O sont réguliers.

Maintenant, les modifications sur les angles a, n'étant évidemment que la répétition de celles qui ont lieu sur les angles A, reproduiront les mêmes formes, mais dans une position inverse; et parce que les modifications sur les deux sortes d'angles, quoique indépendantes, peuvent exister simultanément, en vertu du principe général des combinaisons, chaque forme directe pourra se combiner avec son inverse, et redonner ainsi la forme complète dont elle a été dérivée par *hémiédrie*. On aura ainsi un octaèdre régulier par la combinaison de deux tétraèdres, un trapézoèdre par la combinaison de deux tétra-trièdres, un octa-trièdre par la combinaison de deux dodécaèdres trapézoïdaux, et un dodéca-tétraèdre par la combinaison de deux tétra-hexaèdres.

En résumant ce qui précède, on voit que toutes les formes du système cubique proprement dit peuvent se rencontrer dans le système tétraédrique, avec d'autres formes qui sont exclusivement propres à ce dernier. Les formes propres, et par conséquent caractéristiques de ce système, sont : le *tétraèdre*, le *tétra-trièdre*, le *dodécaèdre trapézoïdal*, et le *tétra-hexaèdre*. Ces quatre formes caractéristiques ont pour caractère commun de ne point avoir de faces parallèles. On remarquera que parmi les formes communes aux deux systèmes, il en est que l'on ne saurait obtenir dans le second que par la combinaison de deux modifications différentes, et qu'on ne peut pas par conséquent considérer comme des formes simples : tels sont l'octaèdre régulier, le trapézoèdre, l'octa-trièdre et le dodéca-tétraèdre. Ainsi, ces formes, qui sont simples dans le premier système, sont ici de véritables combinaisons ou formes composées. Les seules formes qui soient simples dans le système tétraédrique, sont les suivantes, au nombre de sept, comme dans le système précédent : le *tétraèdre*, le *tétra-trièdre*, le *cube*, le *dodécaèdre trapézoïdal*, le *dodécaèdre rhomboïdal*, l'*hexa-tétraèdre* et le *tétra-hexaèdre*. — Rappelons-nous encore ce que nous avons dit ailleurs, que les formes communes à deux systèmes de même genre diffèrent toujours par leur structure et leur caractère de symétrie, et qu'ici, par exem-

ple, toutes ces formes doivent avoir, malgré l'apparence contraire, le caractère hémiédrique. C'est ce que nous voyons pour le cube, quand nous le prenons pour forme primitive du système. Ce sont ces différences essentielles qui établissent l'individualité et l'indépendance du système cubo-tétraédrique.

Si l'on prenait pour forme fondamentale, une autre forme que le cube, mais qui fût, comme celle-ci, commune au système tétraédrique et au système cubique, on serait encore obligé d'assigner à cette forme type une symétrie différente de celle qu'elle avait dans le premier système; mais, toute considération d'hémiédrie disparaîtrait, si l'on adoptait pour point de départ une des formes *propres* au système, le tétraèdre par exemple: dans ce cas, c'est par des modifications holoédriques, en rapport avec la symétrie complète ou purement géométrique de ce solide, que l'on parviendrait à en faire dériver *toutes* les autres formes du système. Il ne sera pas inutile d'entrer ici dans quelques développements à ce sujet.

La figure 25 représente le tétraèdre fondamental avec sa notation. D'après la nature de ses parties terminales, il est facile de voir que les modifications qui peuvent avoir lieu sur chaque angle ou chaque arête, sont en même nombre et de mêmes sortes que celles que le cube nous a présentées dans le premier système; il y aura donc deux modifications pour les arêtes et quatre pour les angles.

Le tétraèdre modifié sur les arêtes par une seule facette (fig. 27) donne le cube (fig. 28), que l'on a représenté strié parallèlement aux arêtes du tétraèdre générateur. Modifié sur les mêmes arêtes par deux facettes (fig. 29), il passe au tétra-trièdre (fig. 30). Le cube de la modification précédente n'est qu'une limite ou un cas particulier du tétra-trièdre, dont il conserve le caractère de symétrie tétraédrique.

Le tétraèdre modifié sur les angles par une facette (fig. 31) reproduit le même tétraèdre dans une position inverse, et la combinaison des deux tétraèdres donne l'octaèdre régulier (fig. 32).

Une modification sur les angles par trois facettes correspondantes aux faces primitives (fig. 33) donnerait le dodécaèdre trapézoïdal (fig. 34), qui, dans un cas particulier, devient un dodécaèdre rhomboïdal; ce cas a lieu lorsque chaque trapézoïde a une égale inclinaison sur les faces du tétraèdre fondamental et sur celles du tétraèdre inverse (fig. 31), ou, ce qui est la même chose, sur les faces adjacentes de l'octaèdre (fig. 32).

Lorsque la facette modifiante est inégalement inclinée sur les faces de l'un et de l'autre tétraèdre, le solide dérivé est toujours un dodécaèdre trapézoïdal; et comme l'inclinaison la plus forte peut avoir lieu soit sur le tétraèdre direct, soit sur le tétraèdre inverse, on peut obtenir, par deux modifications du même genre, deux dodécaèdres trapézoïdaux exactement pareils, l'un en position directe, l'autre en position inverse. Ces deux dodécaèdres réunis donneraient l'octa-trièdre (fig. 12).

Une autre modification sur les angles par trois facettes, posées sur les arêtes, comme on le voit fig. 35, produirait un tétra-trièdre (fig. 36) semblable à celui de la figure 30, mais dans une position renversée. De la combinaison de ces deux tétra-trièdres, réunis entre eux dans les positions relatives que leur donne la dérivation, résulterait le trapézoèdre symétrique à vingt-quatre faces (fig. 10).

Enfin, la modification des angles par six facettes (fig. 37) produit en général un tétra-hexaèdre (fig. 38), qui, dans une circonstance particulière (savoir, lorsque les facettes modifiantes sont également inclinées sur les faces des tétraèdres direct et inverse), se change en un hexa-tétraèdre (fig. 6). Dans le cas général d'une inégale inclinaison sur les deux tétraèdres, comme l'inclinaison la plus forte peut avoir lieu soit sur l'un, soit sur l'autre, il est possible d'obtenir par deux modifications du même genre deux tétra-hexaèdres égaux, mais l'un en position directe, et l'autre en position inverse. La réunion de ces deux tétra-hexaèdres donnerait le dodéca-tétraèdre (fig. 14).

Le tétra-hexaèdre est une forme hémiédrique relativement au dodéca-tétraèdre; il peut lui-même se résoudre en deux autres formes hémiédriques, par le prolongement de ses faces prises par moitié et d'une manière alternative, sur chacun des angles à six faces. Quelques auteurs indiquent ces formes hémiédriques de second ordre (ou formes tétartoédriques) comme étant des dodécaèdres pentagonaux semblables à celui de la pyrite; mais Mohs a fait voir que ce sont *en général* des dodécaèdres pentagonaux à faces non symétriques, ayant l'aspect du tétraèdre dont ils dérivent. Leurs faces sont des pentagones irréguliers à trois sortes d'arêtes $a, a; b, b;$ et c. Ce n'est que dans des cas particuliers que les arêtes a et b deviennent égales, et que le dodécaèdre prend l'*apparence* de l'hexa-dièdre, dont il sera question ci-après. Ces dodécaèdres à faces non symétriques ont été décrits par Mohs sous le nom de *dodécaèdres pentagonaux tétraédriques*.

Ils n'ont point été observés parmi les cristaux naturels. Mais nous avons dit (p. 94) que M. Rammelsberg les avait rencontrés dans la série cristalline du chlorate de soude.

On ne connaît que six espèces minérales dont les formes se rapportent au système tétraédrique, ce sont : la boracite, la blende, l'helvine, le cuivre gris, la pharmacosidérite et le wismuthblende ou bismuth silicaté.

3. SYSTÈME HEXA-DIÉDRIQUE OU DU DODÉCAÈDRE PENTAGONAL.

Système cubique, à modifications para-hémiédriques.

CARACTÈRE PHYSIQUE DES AXES.

TROIS AXES RECTANGULAIRES, ISOPOLAIRES, BILATÉRAUX (A^2). FORME REPRÉSENTATIVE DE LA MOLÉCULE : LE DODÉCAÈDRE PENTAGONAL (fig. 20, pl. I).

Dans ce système, le cube fondamental (fig. 39) se comporte comme si les lignes ou files moléculaires *b b*, *b' b'*, qui, sur la même face, sont parallèles aux arêtes et d'égale longueur, n'étaient pas physiquement identiques, et qu'en outre les lignes de même valeur *b b*, *b b*, ou *b' b'*, *b' b'*, sur deux faces adjacentes fussent à angles droits l'une sur l'autre. Il suit de là que le cristal n'est pas symétrique à l'égard du plan diagonal qui passe par deux arêtes opposées; que, par conséquent, la droite et la gauche de chaque arête ne sont pas semblables, et que la modification d'un bord ou d'un angle considéré à part aura lieu généralement comme si ce bord ou cet angle faisait partie d'un prisme rectangulaire à côtés inégaux. La notation qui convient à cette symétrie est celle de la figure 39, où chaque arête est représentée par les deux lettres *b* et *b'*, placées l'une à droite et l'autre à gauche. Les cubes qui appartiennent au cas dont nous parlons, sont fréquemment dans la nature striés sur leurs faces dans des directions parallèles aux lignes *b b*, ou aux lignes *b' b'*, mais jamais aux deux sortes de lignes à la fois; il en résulte qu'il n'y a de stries pour chaque face que dans un seul sens, et que sur les trois faces adjacentes d'un même angle solide, les stries se croisent à angles droits, comme le montre la figure 40.

À raison de la symétrie qui lui est particulière, le cube, dans ce système, n'est susceptible que d'un seul genre de modification

simple sur les arêtes, et de deux genres de modifications simples sur les angles.

1° *Sur les arêtes*. Le cube (fig. 39) ne peut être modifié que par une seule facette, qui sera généralement inclinée d'une manière inégale sur les deux faces adjacentes. Si la facette penche plus du côté *b* que du côté *b'*, on a la modification fig. 41, et les nouvelles facettes, au nombre de douze, étant prolongées jusqu'à ce qu'elles s'entrecoupent, donneront l'*hexa-dièdre* ou *dodécaèdre pentagonal* (fig. 42). Ce solide est composé de douze pentagones égaux et symétriques, ayant deux sortes de côtés, savoir : un côté unique *c*, base du pentagone, et quatre côtés égaux *b*; les angles plans sont de trois espèces : l'angle opposé à la base est unique, les deux angles adjacents à la base sont égaux entre eux, ainsi que les deux autres angles intermédiaires (1).

Si la facette modifiante est inclinée de la même quantité, mais en sens contraire, de manière qu'elle penche plus du côté de *b'* que du côté de *b*, on a un nouveau dodécaèdre pentagonal, entièrement semblable à celui de la figure 42, mais tourné par rapport à lui de 90° autour de l'axe qui passe par les milieux de deux arêtes *c* opposées. La combinaison de ces deux dodécaèdres, placés comme nous venons de le dire, à angle droit l'un sur l'autre, donnerait l'*hexa-tétraèdre* (fig. 6); ainsi, le dodécaèdre pen-

(1) Si la cristallisation ne reconnaissait d'autre loi que la loi de symétrie, on pourrait, en faisant varier arbitrairement l'inclinaison des faces du dodécaèdre à l'endroit des arêtes *a*, obtenir une infinité de ces solides qui tous seraient également possibles; mais, on l'a vu, il existe une seconde loi, d'après laquelle les faces de toute forme secondaire doivent couper les arêtes de la forme fondamentale dans des rapports simples et rationnels. Cette loi, qui réduit à un très-petit nombre les espèces de dodécaèdres qui peuvent dériver du cube, donne les moyens de les calculer ou de les connaître *a priori*, puisqu'il ne faut pour cela que chercher ceux que l'on obtiendrait du cube, en le modifiant par les lois les plus simples de troncature. Cette remarque peut servir à expliquer comment on n'a encore observé jusqu'à présent que fort peu de solides de ce genre, et pourquoi il en est un qui se montre beaucoup plus fréquemment que les autres, et qui seul s'est offert isolé; ce dodécaèdre est celui que quelques cristallographes ont appelé *pyritoèdre*, parce qu'il est la forme ordinaire et caractéristique de la pyrite commune : il dérive du cube par la loi la plus simple possible, après celle qui donne le dodécaèdre rhomboïdal, ses faces coupant les arêtes du solide fondamental dans le rapport de 1 à 2.

On pourrait se demander si, parmi tous les dodécaèdres pentagonaux qui sont possibles, ne se rencontrerait pas, comme cas particulier, le dodécaèdre régulier de la géométrie. Haüy a montré par le calcul, que ce solide ne pouvait pas être produit de cette manière, parce qu'il ne pourrait être dérivé du cube que par une modification dont les plans couperaient les arêtes de cette dernière forme dans un rapport irrationnel.

tagonal ou l'hexa-dièdre est une forme hémiédrique à l'égard de l'hexa-tétraèdre, et cette propriété est indiquée par les dénominations que nous avons adoptées pour désigner les deux solides.

Dans le cas particulier où la facette modifiante s'inclinerait également sur les deux faces adjacentes, on aurait pour forme secondaire un *dodécaèdre rhomboïdal*, que l'on peut considérer comme la limite des deux séries de dodécaèdres pentagonaux, résultant de la variation d'inclinaison de la facette, d'abord dans un sens, et ensuite dans le sens opposé.

On connaît plusieurs hexa-dièdres, dont deux dérivent d'hexa-tétraèdres connus, savoir, des hexa-tétraèdres dont les signes sont : $(a : 2a : \infty a)$ et $\left(a : \frac{3}{2}a : \infty a\right)$, ou bien b^2, $b^{\frac{3}{2}}$.

Le premier. qui est le plus simple de tous par sa loi de dérivation, se rencontre le plus fréquemment, et il est le seul qui se présente isolé dans la pyrite commune et dans le cobalt gris. On lui a donné le nom de *pyritoèdre*, du mot pyrite, parce qu'il est la forme la plus ordinaire de ce minéral. Ses angles dièdres, correspondant aux arêtes *c* et *b*, sont de 126° 52' et 113° 35'. Les autres hexa-dièdres, qu'on a aussi appelés *pyritoïdes*, ne se montrent qu'en combinaison, le plus souvent avec le cube et le pyritoèdre, dont ils ne se distinguent que par la différente inclinaison de leurs faces sur celles du cube.

2° *Sur les angles*. La modification peut avoir lieu, ou par une seule facette également inclinée sur les trois faces de l'angle, ou par trois facettes seulement, le cas de six facettes étant exclu, du moins comme modification simple, par la symétrie particulière au cube dans le système dont il s'agit ici. La modification par une facette donnera, comme dans le système cubique proprement dit, un *octaèdre régulier*.

Dans la modification par trois facettes, celles-ci sont généralement situées de biais, coupant inégalement les trois arêtes de l'angle du cube, et s'inclinant par conséquent d'une manière inégale sur les trois faces de cet angle, mais toutes tournées dans le même sens, comme on le voit fig. 43 ; ces facettes, prolongées jusqu'à s'entrecouper, donneront un solide particulier (fig. 44) à vingt-quatre faces trapézoïdales, non symétriques, ayant trois sortes d'arêtes *b c d*. Ce solide présente l'apparence d'un dodécaèdre pentagonal, dont les faces auraient été brisées ou pliées en deux moitiés symétriques et relevées en forme de coin : son

principal caractère étant donc d'avoir douze coins ou angles dièdres égaux *c*, *c*, correspondant aux faces d'un dodécaèdre pentagonal, nous le nommerons, à cause de cela, *dodéca-dièdre*.

Les facettes modifiantes, que nous avons placées de biais sur chaque angle, et qui s'inclinent toutes dans le même sens, pourraient être disposées en sens contraire autour de l'angle avec les mêmes inclinaisons que dans le cas précédent : on aurait alors un second dodéca-dièdre, tout-à-fait semblable au premier, et qui n'en différerait que par sa position ; il suffirait de faire tourner l'un de ces solides de 90° autour de la verticale, pour qu'il coïncidât avec l'autre.

En combinant entre eux ces deux dodéca-dièdres dans les positions relatives que leur donne le procédé de dérivation, on aurait, comme forme composée, un solide à quarante-huit faces triangulaires, semblable à celui de la figure 14, ou un *dodéca-tétraèdre*. Le dodéca-dièdre est donc une forme hémiédrique, par rapport au dodéca-tétraèdre.

On connaît trois espèces de dodéca-dièdres, dont deux se présentent plus fréquemment, soit à l'état de combinaison, soit même isolément : nous nous bornerons à citer ces deux espèces, qui dérivent par hémiédrie des deux dodéca-tétraèdres cités p. 115, et dont les signes sont

$$\left(a : \frac{1}{2}a : \frac{1}{3}a\right), \text{ et } \left(a : \frac{1}{2}a : \frac{1}{4}a\right).$$

Les valeurs des angles dièdres, en *b*, *c* et *d*, sont : pour le premier, représenté figure 44, 141°47', 149°, et 115°23' ; pour le second, 131°49', 154°47', et 128°15'. On les a observés isolés dans les pyrites du val de Brosso en Piémont, dans celles de l'île d'Elbe, et de Presnitz en Bohême. Le second dodéca-dièdre a cela de particulier, que ses faces ne sont pas seulement des trapézoïdes irréguliers, mais qu'elles s'offrent sous l'aspect de véritables trapèzes, l'arête *c* étant parallèle à l'arête opposée *b*.

Le premier se présente le plus souvent en combinaison, soit avec le cube, soit avec l'octaèdre ou le pyritoèdre. Dans la figure 43, on voit le dodéca-dièdre former sur les angles du cube, des pointements à trois faces situées de biais, et inclinées toutes dans le même sens. Quelquefois il forme des pointements analogues, sur huit angles du pyritoèdre (fig. 48). Dans d'autres cas, il forme sur les six angles de l'octaèdre, des pointements à quatre faces, qui sont des triangles scalènes.

Si l'on suppose que dans la figure 43, qui représente la combinaison du cube et du premier dodéca-dièdre, les facettes trapézoïdales prennent successivement une extension plus grande, il arrivera un moment où les six faces du cube se réduiront à des rhombes égaux, comme on le voit figure 45, et les premières facettes, quoique étant toujours des trapézoïdes irréguliers, approcheront cependant assez de la figure rhomboïdale, pour qu'on puisse croire, à la première vue, qu'elles sont égales et semblables aux six autres faces; c'est en effet ce qu'avait pensé Romé de l'Isle, qui l'avait prise pour une forme simple; mais ce solide à trente faces, et qu'on a appelé *triacontaèdre*, n'a pas la symétrie qu'il lui supposait. Il existe cependant en géométrie, comme l'a fait voir Haüy, un triacontaèdre symétrique, terminé par trente rhombes égaux; mais il n'est pas plus possible en cristallographie que le dodécaèdre régulier, dont il serait un des dérivés les plus simples, car on l'obtiendrait en modifiant ce dodécaèdre par une seule facette tangente sur toutes ses arêtes.

Quoique les facettes de la modification (fig. 43) coupent généralement d'une manière inégale les trois arêtes de l'angle, cependant il peut arriver, comme cas particulier, que les sections soient égales pour deux arêtes du cube, ce qui assimilera la modification à celle qui a lieu dans le système cubique proprement dit; et comme les facettes modifiantes peuvent avoir leur plus forte inclinaison, soit du côté des arêtes, soit du côté des faces, on aura, comme dans le système cubique, deux cas à considérer: dans le prêmier cas, on aura, pour forme dérivée, un octa-trièdre (fig. 12); dans le second, un trapézoèdre symétrique (fig. 10).

En résumé, l'on voit que toutes les formes du système cubique proprement dit peuvent se rencontrer à titre de formes simples ou de formes composées, dans le système hexa-dièdrique, avec d'autres formes qui sont propres à ce dernier. Les formes propres et caractéristiques du système hexa-diédrique sont : le *dodécaèdre pentagonal*, et le *dodéca-dièdre ;* les autres formes simples du système sont : le *cube*, l'*octaèdre*, le *dodécaèdre rhomboïdal*, le *trapézoèdre*, et l'*octa-trièdre*. Le nombre total des formes simples est donc de sept, comme dans les deux premiers systèmes. Les deux formes hémiédriques, propres au système hexadiédrique, ont des faces parallèles deux à deux, ce qui les distingue des formes hémiédriques propres au système tétraédrique. Si chacun de ces deux groupes de formes hémiédriques peut coexister séparément avec toutes les formes du système cubique

proprement dit, ils ne sauraient exister ensemble dans le même minéral, parce qu'ils ont une symétrie différente ; ils appartiennent donc à des systèmes bien réellement distincts (1).

Si l'on prenait pour forme fondamentale du système hexadiédrique, une des deux formes propres à ce système, par exemple l'hexa-dièdre ou dodécaèdre pentagonal, on pourrait alors en faire dériver le système tout entier par des modifications toutes holoédriques , c'est-à-dire par des modifications réglées sur la symétrie purement géométrique de la forme, ainsi que nous l'avons déjà fait voir pour le tétraèdre dans le système précédent. La figure 47 représente le dodécaèdre fondamental, avec la notation qui lui convient. Ce solide a huit angles A formés d'angles plans égaux ; douze angles E irréguliers ; six arêtes égales C, et vingt-quatre arêtes égales *b b'*. Tout étant symétrique de part et d'autre des arêtes C, ces arêtes pourront recevoir deux espèces de modifications simples, savoir : une modification par une seule facette, et une modification par deux facettes à la fois. Mais il n'en est pas de même des autres arêtes *b b'*, quoique les faces qui y aboutissent soient égales entre elles, ces faces n'étant pas symétriquement placées à droite et à gauche de chaque arête ; elles ne recevront donc qu'une seule facette par modification simple. Enfin, les angles A, quoique formés d'angles plans égaux, ne comporteront pas d'autres modifications simples que celles qui ont lieu par une, ou par trois facettes : la modification par six facettes n'existant pas pour eux comme modification simple, parce que les trois pentagones qui composent l'angle A n'offrent pas la même disposition autour du sommet, quand on les compte de droite à gauche, ou bien dans le sens contraire.

Bornons-nous à indiquer succinctement ici les résultats que l'on obtiendrait en appliquant la méthode des troncatures à la forme fondamentale, fig. 47. La modification des angles A par une facette également inclinée sur les trois faces de l'angle (fig. 48) conduirait à l'octaèdre régulier ; la combinaison de l'octaèdre et du dodécaèdre pentagonal donne un solide à vingt

(1) J'ai dit, p. 94 : Un habile cristallographe allemand, après avoir remarqué que les formes hémiédriques à faces inclinées, et celles qui ont des faces parallèles, n'ont jamais été observées ensemble, avait paru s'étonner de ce fait ; la raison en est cependant bien facile à apercevoir : c'est que ces deux genres de formes sont déterminées par des conditions différentes de symétrie, qu'il paraît difficile de concilier dans un seul et même type. (Voyez G. Rose, *Elemente der Kryst.* p. 49 ; Berlin, 1833.)

faces, que l'on nomme *icosaèdre*. Dans la figure 48, qui représente cette forme composée, les faces du dodécaèdre sont dominantes : mais si l'on tronque plus profondément les angles A, les facettes triangulaires, qui répondent aux faces de l'octaèdre, et qui sont équilatérales, prendront une plus grande étendue aux dépens des faces du dodécaèdre, et celles-ci finiront par se réduire à des triangles isoscèles, comme on le voit fig. 46. L'icosaèdre dont il s'agit peut donc être considéré comme composé de vingt faces triangulaires, dont huit sont équilatérales, et les douze autres seulement isoscèles ; il diffère par conséquent de l'icosaèdre de la géométrie, dont toutes les faces sont égales et régulières (1).

La modification des arêtes C par une facette (fig. 49) mène au cube ; les angles E, modifiés par une seule facette (fig. 50), donneront pour forme dérivée un solide à douze faces, qui sera un nouveau dodécaèdre pentagonal. D'autres dodécaèdres de la même espèce résulteraient évidemment de la modification des arêtes C par deux facettes, également inclinées de part et d'autre de ces arêtes. Dans la série des dodécaèdres que l'on peut ainsi obtenir, en faisant varier les inclinaisons des facettes modifiantes, se trouve compris comme cas particulier le dodécaèdre rhomboïdal.

Enfin, la modification des douze angles E, chacun par deux facettes (fig. 51), et celle des huit angles A, chacun par trois facettes (fig. 52), produiront toutes deux des dodéca-dièdres, parmi lesquels pourront se rencontrer, comme cas particuliers, des trapézoèdres symétriques et des octa-trièdres.

On ne connaît encore que deux espèces minérales dont les formes se rapportent bien évidemment au système hexa-diédrique. Ce sont : la pyrite et la cobaltine (ou cobalt gris). Des raisons qui seront développées ailleurs tendent à faire croire que la disomose (ou nickel gris) et l'antimon-nickel (antimoine sulfuré nickélifère), que l'on n'a trouvés que très-rarement à l'état cristallin, rentreront dans ce système, lorsque la liste de leurs variétés de formes sera plus complète.

(1) L'icosaèdre régulier est exclu des systèmes dont le cube fait partie, par la même raison que le dodécaèdre régulier et le triacontaèdre à faces égales. Le genre de symétrie qui lui appartient est, en effet, celui de ces deux derniers solides ; et, de même que le triacontaèdre résulte de la troncature tangente des arêtes du dodécaèdre régulier, de même l'icosaèdre est donné par la troncature tangente des angles de ce solide.

DEUXIÈME GENRE.

SYSTÈMES HEXAGONAUX.

CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUE DES AXES.

UN AXE PRINCIPAL, PERPENDICULAIRE A TROIS AUTRES AXES SECONDAIRES, ÉGAUX ENTRE EUX, ET SE CROISANT SOUS DES ANGLES DE 60°.

Il existe deux systèmes principaux, qui sont originaires du prisme hexagonal régulier, pris pour forme fondamentale, savoir: le système hexagonal à modifications holoédriques (système di-hexaédrique ou di-rhomboédrique), et le système hexagonal à modifications hémiédriques et à faces parallèles (*système rhomboédrique proprement dit*). Ces deux systèmes ont des formes qui sont propres à chacun d'eux et d'autres qui leur sont communes; mais ces dernières n'ont pas le même caractère de symétrie, et par conséquent ne se modifient pas de la même manière dans l'un et l'autre système. Toutes ces formes ont d'ailleurs pour caractère commun, d'avoir un axe principal *a*, unique en son espèce, que nous supposerons toujours dirigé verticalement, et trois autres axes secondaires *b*, *b*, *b*, perpendiculaires au premier, égaux entre eux et se coupant sous des angles de 60° (fig. 53).

1. SYSTÈME DI-HEXAÉDRIQUE OU DIRHOMBOÉDRIQUE.

CARACTÈRE PHYSIQUE DES AXES.

UN AXE PRINCIPAL, ISOPOLAIRE, SEXLATÉRAL (A^6).

Le nom de *di-hexaédrique* est tiré de celui de *di-hexaèdre*, qui, d'après les règles de nomenclature que nous avons adoptées, peut servir à caractériser et à dénommer l'une des formes principales du système, savoir le dodécaèdre à base hexagonale et à triangles isoscèles. Celui de di-rhomboèdre vient de ce que le rhomboèdre, étant une forme hémiédrique par rapport au di-hexaèdre, celui-ci peut être considéré comme étant un double rhomboèdre.

Les figures 53 et 54, pl. VI, représentent un prisme hexagonal, choisi pour forme fondamentale; la seconde avec la notation qui convient à sa symétrie, dans le cas de modifications toutes holoédriques. Ce solide a deux bases égales et horizontales, qui sont des hexagones réguliers, et six pans ou faces latérales, qui

sont des rectangles égaux. Il a douze angles solides égaux A, composés de deux angles plans égaux et d'un troisième, qui diffère des premiers; ses arêtes sont de deux sortes, savoir : douze arêtes horizontales B, égales entre elles, ou *arêtes des bases*, formées par la rencontre de faces inégales, et six arêtes verticales C, pareillement égales entre elles, mais non avec les précédentes, et formées par la rencontre de faces égales.

D'après ces caractères de symétrie, le prisme hexagonal est susceptible de cinq sortes de modification, savoir : de deux espèces de modification sur les angles, d'une seule espèce de modification sur les arêtes des bases, et de deux sortes de modification sur les arêtes verticales.

Le prisme hexagonal, fig. 54, peut être modifié sur les angles :

1° *Par une seule facette*, coupant également les deux arêtes B de l'angle A, comme on le voit fig. 55; on a ainsi douze facettes modifiantes, qui, prolongées suffisamment, produisent le dodécaèdre hexagonal ou *di-hexaèdre* (fig. 56).

La notation des faces de ce di-hexaèdre, exprimée seulement en fonction des côtés de l'angle modifié, est $(ma : b : b)$ ou e^m, m représentant un nombre rationnel simple, entier ou fractionnaire. Si l'on y fait entrer les quatre axes, elle devient : $(ma : b : \frac{1}{2} b : b)$. Il suffit de mesurer un seul de ses angles dièdres, pour pouvoir déterminer complètement un pareil solide. Dans chaque espèce minérale, on rencontre un grand nombre de variétés de cette forme, et toujours leurs axes sont en rapport simple avec ceux de la forme fondamentale.

2° *Par deux facettes* également inclinées sur les pans, de part et d'autre de l'arête commune C (fig. 57); toutes ces facettes réunies donneront un solide à vingt-quatre triangles scalènes égaux, partagés en deux pyramides dodécaèdres à base horizontale, ou un *di-dodécaèdre* (fig. 58).

La notation générale de ces di-dodécaèdres est $(ma : nb : pb : b)$. Ces formes sont rares, et leurs faces sont toujours subordonnées dans les combinaisons dont elles font partie.

Le prisme hexagonal peut être modifié sur les arêtes verticales :

1° *Par une seule facette*, également inclinée sur les deux pans, ou coupant également les arêtes B, B, comme fig. 59; ce qui conduit à un autre prisme hexagonal (fig. 60). Ce prisme secondaire et celui de la figure 54 diffèrent par leur position, en ce que

l'un des deux est tourné sur son axe de 30° par rapport à l'autre. La combinaison des deux prismes, représentée par la figure 60, est un prisme dodécaèdre équiangle (1).

2° *Par deux facettes*, formant biseau (fig. 61); forme dérivée: *prisme dodécaèdre symétrique*, à angles alternativement égaux fig. 62).

La section transverse de ces prismes est de même nature que la base des di-dodécaèdres. Leur notation générale est $(\infty\, a : nb : pb : b)$.

Enfin, le prisme hexagonal peut être modifié sur les arêtes des bases, *par une seule facette*, inclinée généralement d'une manière inégale sur la base et sur le pan correspondant (fig. 63). Cette modification conduira à un nouveau *di-hexaèdre* (fig. 64), qui différera par sa position de celui de la figure 56. On voit, en effet, que les deux solides sont situés de manière que les faces de l'un correspondent aux arêtes de l'autre, et réciproquement; et, si l'on supposait ces deux solides égaux en dimensions, il faudrait, pour les ramener à être parallèles, que l'on fît tourner l'un d'eux de 30° autour de son axe. La combinaison des deux di-hexaèdres (fig. 56 et fig. 64) donnerait une espèce particulière de didodécaèdre à triangles isoscèles (2).

On voit que de même qu'il existe deux prismes hexagonaux, de position différente, il existe pareillement deux ordres de di-hexaèdres, qui se distinguent par leur position. Dans les uns, les faces de la pyramide correspondent aux angles du prisme fondamental : ce sont les di-hexaèdres de position normale. Dans les autres, les faces de la pyramide répondent aux angles du prisme fondamental : ces di-hexaèdres sont dits être en position diagonale.

Nous aurions pu prendre pour forme fondamentale du système di-rhomboédrique, le di-rhomboèdre lui-même, que la figure 64 représente avec la notation qui lui est propre, et ce choix eût été d'autant plus convenable que le di-rhomboèdre ou

(1) Ce prisme est seulement équiangle, et non pas régulier, comme le disent la plupart des auteurs. Pour qu'il fût régulier, il faudrait que les côtés de ses bases fussent égaux ; or, il est facile de voir que les plans qui transformeraient les bases en dodécagones réguliers, couperaient chaque arête B en parties qui seraient dans un rapport irrationnel avec l'arête entière, ce qui ne saurait avoir lieu, d'après la loi générale qui règle les troncatures.

(2) Ce di-dodécaèdre serait une double pyramide régulière, si les di-hexaèdres combinés étaient égaux entre eux. Mais l'existence simultanée de deux di-hexaèdres à faces également inclinées sur l'axe n'est pas possible, parce que les faces de l'un d'eux couperaient les arêtes de l'autre dans des rapports irrationnels. Il n'y a donc pas de di-dodécaèdres à sommets réguliers dans le système di-hexaédrique.

di-hexaèdre est une des formes simples du système. Nous aurions eu à considérer deux espèces d'angles, les angles terminaux A et les angles latéraux E, et deux sortes d'arêtes, les arêtes culminantes B, et les arêtes C de la base. Les angles A auraient été dans le cas d'être modifiés par une, par six et par douze facettes; les angles E par une, deux et quatre facettes, et chaque sorte d'arêtes par une et par deux facettes; mais plusieurs de ces modifications reproduisant le même solide, nous eussions eu en dernière analyse les mêmes résultats que ci-dessus. Sans entrer dans plus de détails à ce sujet, nous nous bornerons à faire remarquer que la modification des angles A, des arêtes C, ou des angles E par une facette, et celle des angles E par deux facettes seulement, ne donnent point de solides complets, c'est-à-dire fermés ou limités de toutes parts; car l'une ne produit que deux plans horizontaux (fig. 65), qui sont les bases des prismes du système, et les autres ne donnent que les pans de ces mêmes prismes, c'est-à-dire des faces verticales, au nombre de six ou de douze (fig. 66). Chacune de ces modifications ne peut donc exister seule, ou sans être combinée avec d'autres faces. Ainsi l'on voit que le prisme hexagonal et le prisme dodécaèdre ne sont pas des formes simples, mais des combinaisons de deux modifications différentes. Les seules formes du système qui soient simples, parmi les formes complètement fermées, sont le di-hexaèdre et le di-dodécaèdre à triangles scalènes.

Les cristaux de plusieurs espèces minérales se rapportent au système di-rhomboédrique; nous citerons comme exemples, les minéraux appelés béryl, néphéline, pyromorphite, etc.

2. SYSTÈME RHOMBOÉDRIQUE; SYSTÈME HEXAGONAL, A MODIFICATIONS PARA-HÉMIÉDRIQUES.

CARACTÈRE PHYSIQUE DES AXES.

UN AXE PRINCIPAL ISOPOLAIRE, SEXLATÉRAL, A CÔTÉS ALTERNES ($_{3}A^{3}$).
FORME REPRÉSENTATIVE DE LA MOLÉCULE : LE RHOMBOÈDRE.

Dans ce système, malgré l'égalité géométrique qui existe entre les six arêtes des bases, et entre les six pans du prisme hexagonal, les choses se passent comme si l'identité n'avait lieu qu'entre les arêtes horizontales alternatives, et comme si tout n'était pas symétrique à droite et à gauche de chaque arête verticale. C'est

ce qu'exprime la notation de la figure 67. D'après cette symétrie particulière, les modifications simples ne peuvent avoir lieu que par une facette sur les angles A et sur les arêtes C; en outre, la modification des arêtes B doit se faire indépendamment de celle des arêtes B', et réciproquement.

En modifiant donc par une facette les six arêtes B, comme on le voit figure 68, pl. VII, et en prolongeant ces facettes jusqu'à ce qu'elles s'entrecoupent, on aura pour forme dérivée un solide composé de six rhombes égaux (fig. 69), auquel Haüy a donné le nom de *rhomboïde*, nom que la plupart des cristallographes ont remplacé par celui de *rhomboèdre* (1). Ce solide est évidemment, d'après son mode de génération, une forme hémiédrique à l'égard du di-hexaèdre.

Le rhomboèdre a ses faces disposées symétriquement autour d'un axe vertical, passant par deux axes solides opposés, A A. Ces deux angles, qui sont égaux entre eux, sont des angles réguliers, ou formés d'angles plans égaux, et par conséquent aussi d'angles dièdres égaux; les sommets de ces deux angles s'appellent les sommets du rhomboèdre. On dit qu'un rhomboèdre est obtus ou aigu, selon que l'angle plan ou l'angle dièdre, qui fait partie des angles terminaux, est plus grand ou plus petit que 90°. La figure 69 représente un rhomboèdre aigu, et la figure 70 un rhomboèdre obtus. Il y a dans un rhomboèdre une seconde espèce d'angles solides: savoir: les six angles solides latéraux E, qui sont composés chacun de deux angles plans égaux, et d'un troisième qui diffère des premiers. Enfin, on doit distinguer deux sortes d'arêtes, les six arêtes culminantes B, dont trois supérieures, et trois inférieures, et les six arêtes latérales D: en effet, les angles dièdres situés en D sont suppléments des angles dièdres en B. Un rhomboèdre est parfaitement déterminé, quand on donne la valeur de l'angle dièdre qui correspond aux arêtes culminantes. On remarquera que le système des quatre axes du prisme hexagonal se retrouve dans cette forme, et que sa

(1) On aurait peut-être dû conserver la dénomination de *rhomboïde*, que les écrits de savants nombreux et célèbres (Haüy, Malus, Biot, Arago, Fresnel, etc.) semblaient avoir consacrée, et cela avec d'autant plus de raison que la dénomination nouvelle n'est pas elle-même à l'abri de toute critique. Mais ce changement de nom, motivé sur ce que le mot rhomboïde sert à désigner dans plusieurs langues le parallélogramme, ayant été presque généralement adopté, nous avons cru devoir, sur ce point, nous conformer à l'usage. Le changement dont il s'agit a d'ailleurs cet avantage, qu'il en amènera sans doute un autre non moins utile, savoir: la substitution du mot rhomboïde à la dénomination si longue et si peu commode de parallélogramme.

disposition est telle que l'axe principal se confond avec celui du rhomboèdre, tandis que les trois axes horizontaux coïncident avec les droites menées du centre du rhomboèdre au milieu des arêtes latérales D.

Le rhomboèdre étant la forme la plus remarquable du système, et celle qui se rencontre le plus communément, il est d'usage de la prendre pour forme fondamentale, et d'en faire dériver toutes les autres par des modifications qui, à son égard, sont toutes holoédriques. Ce solide ayant deux sortes d'angles et deux sortes d'arêtes, est susceptible d'un grand nombre de modifications, qui s'identifient tellement dans leurs résultats, que les formes simples du système se réduisent à deux solides seulement, le rhomboèdre et le scalénoèdre; encore ce dernier pourrait-il être considéré lui-même comme l'assemblage de deux solides égaux de la première espèce; mais les formes de même genre, qui proviennent de modifications diverses, sont distinguées entre elles par leurs positions différentes dans les combinaisons.

Le rhomboèdre fondamental (fig. 69) peut être modifié : 1° *par une facette tangente sur les arêtes culminantes* (fig. 71). Cette modification conduit à un second rhomboèdre, plus surbaissé que celui d'où l'on est parti, et qui est tourné différemment, les faces de l'un correspondant aux arêtes de l'autre, et réciproquement; tel est le rhomboèdre de la figure 70. Quand deux formes de même genre, et qui ont un axe principal commun, sont ainsi placées l'une par rapport à l'autre, de manière que les faces de l'une répondent aux arêtes ou aux angles de l'autre, et réciproquement, on dit que les faces de ces deux formes alternent entre elles, ou que ces formes sont l'une à l'égard de l'autre en position diagonale.

La notation des faces du rhomboèdre tangent est, relativement aux quatre axes du prisme hexagonal $(\frac{1}{2}a : \infty b : b : b)$; et par rapport aux arêtes culminantes du rhomboèdre $[B : B : \infty B]$, ou, suivant la notation très-simple employée par Haüy et les autres cristallographes de son école, b^1..

Si sur le premier rhomboèdre tangent, on suppose qu'il se fasse une nouvelle modification tangente, on aura un troisième rhomboèdre plus obtus, dont le signe sera $(\frac{1}{4}a : \infty b : b : b)$. On peut obtenir ainsi une série de rhomboèdres tangents les uns aux autres, et de plus en plus obtus, dont les axes seront comme les

nombres $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}$..., 1 représentant l'axe du rhomboèdre primitif, et les axes secondaires étant supposés avoir la même valeur dans toute la série.

Celui-ci, à son tour, peut être considéré comme étant le rhomboèdre tangent d'un rhomboèdre plus aigu, dont le signe serait $(2a:\infty b:b:b)$; ce dernier serait tangent à un troisième, et ainsi de suite, en sorte que la série dont il vient d'être question se continue en sens inverse par une autre suite de rhomboèdres de plus en plus aigus, dont les axes sont entre eux comme les nombres 2, 4, 8..., etc. Haüy, qui a signalé l'existence de cette série de rhomboèdres, pouvant être dérivés l'un de l'autre, par un même procédé géométrique (1), a de plus fait connaître une autre relation remarquable, qui peut avoir lieu entre les deux portions de la série, qui se composent l'une des rhomboèdres réellement obtus, et l'autre des rhomboèdres aigus; il a fait voir que, si le rapport de a à b dans le rhomboèdre fondamental est rationnel, ou tout au moins le carré de ce rapport, alors les termes qui se correspondent deux à deux dans les moitiés supérieure et inférieure, à partir du premier rhomboèdre obtus et du premier aigu, jouissent de la propriété qu'il nomme *inversion* des angles, et qui consiste en ce que les angles plans de l'un sont égaux aux angles dièdres de l'autre, et réciproquement; et que les sections principales des deux rhomboèdres sont équiangles (2).

2° *Par deux facettes sur les arêtes culminantes*, comme on le voit figure 72; la forme dérivée est en général un *scalénoèdre* (fig. 74), sorte de dodécaèdre pyramidal, formé de triangles scalènes égaux, et dont les arètes moyennes ne sont pas réunies dans un plan, comme celles du di-hexaèdre et du di-dodécaèdre. En prenant les faces de ce solide alternativement, on a deux systèmes de faces, dont chacun donne un rhomboèdre; on peut donc considérer ce solide comme une combinaison de deux rhomboèdres égaux, dans une position relative telle, que l'un est censé avoir tourné de moins que 60° par rapport à l'autre, autour de l'axe commun. Dans un certain cas, la forme dérivée se changera en un *dodécaèdre à triangles isoscèles*, semblable aux di-rhomboèdres du système précédent, mais ce dodécaèdre n'en conservera pas moins la symétrie qui est propre aux scalénoèdres en général, dont il n'est qu'un cas particulier.

(1) *Traité de Cristallographie*, par Haüy, 1er vol., p. 299.
(2) *Ibidem*, 1er vol., p. 391.

La notation des faces du scalénoèdre est semblable à celle du di-dodécaèdre, dont il est une forme hémiédrique ; Weiss l'écrit ainsi : $\frac{1}{2}(ma:nb:pb:b)$. Si on la rapporte aux arêtes du rhomboèdre générateur, elle devient ($B^m B^1 B^\infty$), m pouvant être entier ou fractionnaire, ou plus simplement, d'après Haüy et Lévy, b^m.

3° *Par deux facettes sur les arêtes latérales*, fig. 73. Forme dérivée : autre scalénoèdre, à axe plus allongé que celui du rhomboèdre fondamental, et qui a les mêmes arêtes latérales que ce rhomboèdre.

Les scalénoèdres de cette espèce ont le même signe général que les précédents, quand on les rapporte au système des quatre axes ; si on les exprime en fonction des arêtes du rhomboèdre, fig. 69, leur signe est ($B^m D^1 D^\infty$), ou, selon Haüy, d^m.

Chaque scalénoèdre détermine cinq rhomboèdres, qui ont avec lui un rapport extrêmement simple : l'un de ces rhomboèdres est inscrit dans le scalénoèdre : il a les mêmes arêtes latérales, mais son axe est plus court que celui du scalénoèdre, dont il est une fraction très-simple ; on le nomme le rhomboèdre des arêtes latérales. Les deux autres rhomboèdres sont circonscrits au scalénoèdre, et ont le même axe que lui : l'un est tangent à ses arêtes culminantes aiguës, l'autre l'est aux arêtes culminantes obtuses. Deux autres rhomboèdres, qu'on peut appeler le rhomboèdre des arêtes culminantes aiguës, et celui des arêtes culminantes obtuses, sont donnés par des plans qui passent par deux de ces arêtes à la fois.

4° *Par une facette sur les arêtes latérales*, fig. 75. Chaque facette devant être également inclinée sur les deux faces de l'arête qu'elle modifie, et ces deux faces ayant elles-mêmes une égale inclinaison sur l'axe, il résulte de là que les facettes modifiantes seront parallèles à cet axe, c'est-à-dire verticales. La modification totale produira donc six plans verticaux, qui seront les pans d'un prisme hexagonal régulier. Elle ne pourra pas exister seule, puisqu'elle ne donne pas de solide fermé ou complet, et se présentera toujours combinée, soit avec les faces du rhomboèdre fondamental, soit avec celles d'une seconde modification. Le signe des faces de ce prisme est, relativement aux axes, $(\infty a : b : \frac{1}{2} b : b)$, et relativement aux arêtes du rhomboèdre, d^1.

5° *Par une facette sur les angles des sommets*, fig. 76. Cette modification produit deux plans horizontaux, qui deviennent les

bases de tous les cristaux prismatiques. Combinée avec la modification précédente, elle donne un prisme hexagonal, tourné comme celui de la figure 60. Le signe de ces faces terminales est, relativement aux axes, $(a : \infty b : \infty b : \infty b)$, et relativement aux côtés de l'angle A, $(B^1 B^1 B^1)$, ou a^1 (Haüy).

6° *Par trois facettes sur les sommets, correspondantes aux faces*, fig. 77. Forme dérivée : rhomboèdre dont la position est la même que celle de la forme fondamentale. La notation des faces de ces rhomboèdres est, relativement aux quatre axes du prisme hexagonal, $(ma : \infty b : b : b)$, et par rapport aux arêtes culminantes du rhomboèdre primitif $[mB : mB : B]$, ou a^m. Ces rhomboèdres reproduisent dans une position différente, la position normale, ceux que les autres modes de dérivation produisent en position diagonale : c'est une conséquence de ce que les rhomboèdres ne sont que les formes hémiédriques des di-hexaèdres, et que par conséquent chaque rhomboèdre doit avoir son rhomboèdre complémentaire.

7° *Par trois facettes sur les sommets, alternes avec les faces*, fig. 78. Forme dérivée : autre rhomboèdre, en position diagonale avec le rhomboèdre fondamental.

8° *Par six facettes sur les sommets*, fig. 79. Forme dérivée : scalénoèdre, qui dans certains cas particuliers peut se transformer en dodécaèdre à triangles isoscèles.

9° *Par deux facettes sur les angles latéraux*, fig. 80. Forme dérivée : scalénoèdre en général, pouvant dans certains cas devenir un dodécaèdre à triangles isoscèles.

10° *Par une facette sur les angles latéraux*. Cette modification peut donner lieu à deux cas différents. Généralement la facette modifiante sera oblique à l'axe ; on aura alors six plans, qui s'inclineront également trois à trois vers les deux extrémités de l'axe (fig. 81) ; et la forme dérivée sera un rhomboèdre. Les facettes modifiantes peuvent se rejeter soit du côté des faces du rhomboèdre fondamental, soit du côté de ses arêtes culminantes : dans le premier cas, le rhomboèdre secondaire sera tourné dans le même sens que le primitif ; dans le second, il aura ses faces en sens inverse. Lorsque ce dernier cas a lieu, il peut se faire qu'il devienne égal à l'autre rhomboèdre ; et la combinaison de ces deux rhomboèdres égaux, en position diagonale l'un à l'égard de l'autre, donnera une nouvelle sorte de dodécaèdre à triangles isoscèles, qui simulera encore les di-hexaèdres du système précédent, mais qui s'en distinguera par une symétrie

différente; car, malgré cette ressemblance apparence, il n'est rien autre chose qu'un *di-rhomboèdre*, c'est-à-dire une réunion de deux rhomboèdres distincts.

La facette modifiante peut être placée sur l'angle latéral, de manière à être parallèle à l'axe, et par conséquent verticale. Dans ce cas, on a pour la modification totale six plans verticaux (fig. 82), qui sont les pans d'un second prisme hexagonal, tourné comme celui de la fig. 67, et par conséquent en position normale, tandis que celui de la figure 60 est en position diagonale. Le signe des faces de ce prisme est, relativement aux axes $(\infty a : \infty b : b : b)$, et relativement aux arêtes de l'angle latéral, $(2D : 2D : B)$, ou, selon Haüy et Lévy, e^2.

Les deux prismes hexagonaux, si on les considère sous le rapport physique, diffèrent par leur structure, et par conséquent par la disposition des clivages à l'intérieur: ainsi, dans l'espèce du carbonate de chaux, le prisme en position normale se clive sur les arêtes alternatives des bases, tandis que le prisme en position diagonale se clive au contraire sur les angles pris alternativement. Ils diffèrent aussi par la manière dont ils se comportent dans leur combinaison avec un même rhomboèdre, par exemple le rhomboèdre fondamental. Les faces de celui-ci, lorsqu'elles s'ajoutent au premier prisme, correspondent à ses pans; lorsqu'elles s'ajoutent au second prisme, elles correspondent à ses arètes longitudinales. La combinaison des deux prismes hexagonaux donnerait un prisme dodécagone équiangle, analogue par sa base et par sa symétrie au di-dodécaèdre à triangles isoscèles, dont nous avons parlé p. 132, et qui, pour les mêmes raisons que celui-ci, ne peut jamais avoir une base régulière, en prenant ce mot dans le sens rigoureux que lui donnent les géomètres.

On connaît plus de cinquante espèces minérales dont les formes cristallines se rapportent au système rhomboédrique. Nous citerons ici pour exemples, le calcaire spathique, le corindon, la chabasie, le fer oligiste, le cinabre et la dioptase.

Outre les deux modes principaux de symétrie qui caractérisent les systèmes di-rhomboédrique et rhomboédrique, le prisme hexagonal en admet d'autres encore, qui pourraient motiver l'établissement d'autant de systèmes particuliers (1). Mais, parce que quelques-uns de ces systèmes n'ont pas été jusqu'à présent

(1) Nous avons admis ces systèmes particuliers dans une classification générale des systèmes cristallins, que nous avons proposée en 1840, dans notre *Thèse*

observés dans la nature, que les autres sont excessivement rares, et que les formes qui leur sont propres ne se montrent jamais que subordonnées, par rapport à certaines formes des deux systèmes qui précèdent, nous nous bornerons ici à de simples indications, nous réservant de donner plus de détails sur quelques-uns de ces systèmes secondaires, aux articles concernant les espèces minérales qui s'y rapportent.

L'un d'eux est celui que M. Haidinger a le premier observé dans les cristaux d'apatite du Saint-Gothard et de quelques autres localités. La figure 83 représente l'un de ces cristaux, dont la forme dominante est celle d'un prisme hexagonal. On y voit des facettes additionnelles, placées de biais sur les angles, *d'un seul côté* de l'arête longitudinale, au lieu de se répéter des deux côtés à la fois, comme cela a toujours lieu dans le système di-hexaédrique. Elles sont donc situées six à six vers chaque sommet, donnant par leur ensemble, un solide qui est une forme hémiédrique à l'égard du di-dodécaèdre (fig. 58). Il suffit en effet, pour l'obtenir, de supprimer dans le dodécaèdre la moitié droite ou la moitié gauche de chaque groupe ou système de quatre faces qui répond à l'un des pans de la forme fondamentale. Ce solide secondaire est une nouvelle espèce de di-hexaèdre, qui se distingue des deux di-hexaèdres du système principal, par sa position anormale ou intermédiaire, étant tournée sur l'axe commun d'une quantité moindre que 30°, relativement à chacun d'eux. La figure 84 indique la nature du solide fondamental, ou les distinctions à établir dans certaines parties, géométriquement équivalentes, pour rendre raison du changement observé dans la symétrie. Les arêtes horizontales du prisme hexagonal sont toutes identiques entre elles, comme dans le système di-hexaédrique; mais contrairement à ce qui a lieu dans ce système, chaque arête présente une opposition de propriétés physiques, quand on la parcourt de gauche à droite, ou de droite à gauche, en sorte que deux arêtes consécutives ne peuvent s'identifier par superposition, qu'autant qu'on les place l'une sur l'autre sans renversement, en faisant coïncider d'une part les parties gauches entre elles, et d'une autre part les parties droites. C'est pour représenter cette disposition rotatoire des parties dans un plan

sur la structure des cristaux, que nous avons citée précédemment. Les plus importants de ces sous-systèmes sont ceux dont le quarz et la tourmaline offrent des exemples, parce que là les hémiédries polaire et rotatoire se lient à des propriétés physiques fort remarquables.

horizontal, que nous avons marqué les extrémités de chaque arète par des signes différents.

L'espèce d'hémiédrie qui caractérise le système de l'apatite, et qui se manifeste autour de l'axe principal, perpendiculairement à cet axe, conduit à une forme secondaire à faces parallèles, comme celle d'où dérive le rhomboèdre : on pourrait l'appeler une *hémiédrie rotatoire horizontale*. Mais on peut imaginer avec quelques cristallographes allemands un autre genre de symétrie, d'où résulteraient des formes hémiédriques à faces inclinées. Il suffit pour cela de supposer que dans chaque groupe de quatre facettes, qui sur les di-dodécaèdres répond à l'un des pans du prisme hexagonal, l'hémiédrie fasse évanouir la facette gauche supérieure avec la facette droite inférieure, comme on le voit figure 85 ; ou bien la facette droite supérieure avec la facette gauche inférieure, comme figure 86. Ce nouveau genre d'hémiédrie pourrait être appelé *hémiédrie rotatoire oblique*, ou *plagiédrie*. On obtient ainsi pour forme secondaire, un *trapézoèdre* ou *plagièdre hexagonal*, figures 87 et 87 *bis*, à faces non parallèles, et placées de biais en tournant dans chacune des pyramides. Ce solide est composé de douze trapézoïdes égaux, dont les arêtes culminantes sont toutes égales entre elles, mais non les arêtes latérales, qui sont de deux espèces et disposées en zigzag à l'instar de celles des scalénoèdres. La figure 88 représente la forme fondamentale, avec la notation qui convient au cas dont il s'agit.

Dans l'apatite, les facettes obliques sont toutes tournées dans le même sens par rapport aux arêtes longitudinales, par exemple toutes à gauche dans la figure 83, et si l'on vient à renverser le cristal, elles paraissent alors tournées dans le sens opposé. Au contraire, dans le cas des figures 85 et 86, les facettes obliques paraissent toujours tournées de la même manière, quelle que soit celle des deux bases que l'on place en haut : ainsi, elles sont tournées vers la gauche, ou *sinistrorsùm*, dans la figure 85, et tournées vers la droite, ou *dextrorsùm*, dans la figure 86. Il suit de là, que les cristaux produits par les deux modifications, figures 85 et 86, quoique semblablement formés, ne pourraient pas s'identifier par la superposition, si par la pensée l'on voulait les faire coïncider. Ces cristaux, représentés figures 87 et 87 *bis*, constituent réellement deux sortes d'individus différents, qui sont inverses l'un de l'autre, présentant entre eux le même rapport qui existe entre la main gauche et la main droite,

ou bien entre la figure d'un polyèdre et celle de son image vue dans un miroir plan. Le premier cristal se nomme un cristal gauche, et le second un cristal droit. Cette distinction d'individus droits et gauches n'a pas lieu dans le système de l'apatite.

On ne connaît point encore d'espèce minérale dont les cristaux comportent le caractère de symétrie exprimé par la figure 88. On a observé cependant quelquefois les facettes d'un trapézoèdre hexagonal, subordonnées aux faces ordinaires du quarz, principalement dans les variétés enfumées de ce minéral. Mais, comme on va le voir, ce trapézoèdre hexagonal, s'il existe réellement, se montre là bien plutôt comme une combinaison de deux autres formes, que comme une forme réellement simple.

Le système du quarz est caractérisé en effet par une autre sorte de trapézoèdre à faces inclinées, qu'on appelle *trapézoèdre*, ou *plagièdre trigonal*, et qui est une forme tétartoédrique à l'égard des di-dodécaèdres du système principal, et une forme hémiédrique à l'égard des scalénoèdres du sous-système rhomboédrique. Sur six des angles solides latéraux du prisme pyramidé (fig. 89), qui est la forme ordinaire des cristaux de quarz, sont placées des facettes obliques, dont l'ensemble produit le trapézoèdre (fig. 90), formé de six trapézoïdes analogues à ceux de la figure 87. A ce trapézoèdre correspond une autre forme conjuguée, non superposable à la première, et qui se composerait des facettes du scalénoèdre que l'hémiédrie a supprimées. On a donc encore ici deux solides inverses, l'un droit, et l'autre gauche, produits par une hémiédrie, du genre de celle que nous avons déjà nommée *rotatoire oblique*.

On voit que les angles solides atteints par les modifications dont il s'agit, sont ceux qui correspondent à trois des six arêtes longitudinales prises alternativement. Les trois autres arêtes, ou plutôt les angles solides situés à leurs extrémités, peuvent rester intacts ou recevoir une semblable modification ; cette seconde modification, indépendante de la première, existe ou seule, ou concurremment avec elle. Si les deux modifications sont simultanées, il résulte de leur combinaison un solide à douze faces, que l'on doit considérer comme un double trapézoèdre trigonal : c'est ce solide que l'on a pris pour un trapézoèdre hexagonal, qu'il simule en effet d'une manière parfaite.

Au lieu des facettes trapézoïdales obliques de la modification représentée fig. 89, on observe quelquefois sur les mêmes angles, des facettes également inclinées des deux côtés de l'arête et

le figure rhombe (fig. 91) : elles appartiennent à la variété de quarz que Haüy a nommée *rhombifère*. Ces facettes, si elles existaient seules, donneraient un solide composé de deux pyramides triangulaires opposées base à base, ou un *di-trièdre* (fig. 92), qui n'est plus qu'une limite, un cas particulier du plagièdre ou trapézoèdre trigonal (fig. 90).

L'indépendance des deux groupes d'arêtes longitudinales s'annonce encore par une autre sorte de modification, que représente la figure 93, où l'on voit un de ces groupes modifié par des biseaux. Les six facettes modifiantes, si elles existaient seules, donneraient un prisme di-trigonal ou prisme symétrique à six pans, ayant deux espèces d'angles dièdres. Les mêmes arêtes pourraient être aussi modifiées par une seule facette, auquel cas on aurait un prisme droit triangulaire : mais ce cas ne s'est pas encore rencontré jusqu'à présent.

Enfin, le di-hexaèdre, qui forme la terminaison des prismes du quarz, doit être lui-même considéré comme une combinaison de deux rhomboèdres égaux, qui, quelquefois, se montrent solitairement, ou se distinguent par des différences physiques, en sorte que la forme rhomboédrique fait aussi partie du système cristallin du quarz. Le caractère de symétrie qui distingue ce système remarquable, peut être exprimé d'une manière rigoureuse, au moyen de la notation du prisme fondamental (fig. 94).

Si l'on veut prendre pour forme fondamentale du quarz, le rhomboèdre P, P, qu'on obtient par le dédoublement de la pyramide terminale (fig. 89), il faudra, pour expliquer toutes les particularités du système cristallin du quarz, admettre une différence physique entre les arêtes latérales C et D du rhomboèdre, qui sont inclinées en sens contraires, et, par conséquent, assigner à ce rhomboèdre le caractère de symétrie et la notation qu'exprime la figure 44, pl. III. Il en résultera, comme conséquence, que la structure ne sera point symétrique à droite et à gauche des arêtes culminantes B ; en sorte que les files moléculaires homologues, vues d'en haut sur les faces d'un même sommet, offriront une disposition rotatoire, comme celle qu'indique la figure 45. L'axe principal conservera son caractère d'axe isopolaire ; mais les trois axes secondaires, qui joignent les milieux des arêtes C et D, seront devenus hétéropolaires.

Quant à la forme représentative de la molécule du quarz, le plagièdre ou trapézoèdre dissymétrique (fig. 48) étant la forme la plus simple, produite par l'hémiédrie dont il s'agit, on pourra,

conformément à la règle que nous avons établie, p. 95, choisir cette forme caractéristique pour représenter l'élément physique du cristal, comme nous avons dit qu'on pourrait prendre le rhomboèdre pour figurer la molécule dans les espèces rhomboédriques ordinaires. Mais, je ferai remarquer qu'on peut se représenter la forme et la constitution atomique de ces molécules d'une manière plus simple encore, et par cela même plus probable. Tout rhomboèdre (fig. 46) peut, par une troncature sur ses deux sommets principaux, être réduit à la forme d'un rhomboèdre tronqué ou *basé* (fig. 47) : et en prenant ce rhomboèdre basé pour forme représentative du polyèdre moléculaire, on aura un solide, moins simple sans doute au point de vue géométrique, mais plus simple au point de vue de la structure atomique : car, ainsi que l'indique la figure, on peut le regarder comme constitué par six atomes de même espèce, formant deux triangles équilatéraux, disposés parallèlement en sens inverse, c'est-à-dire tournés de 60° l'un à l'égard de l'autre. Si les deux triangles composants, au lieu d'alterner ainsi, étaient ramenés à la position parallèle et directe, les mêmes atomes formeraient alors un prisme droit triangulaire (fig. 50). Il suffit maintenant, pour avoir la molécule du quarz, de supposer que les deux triangles prennent une position intermédiaire entre celles qui déterminent les deux cas précédents, et l'on aura l'assemblage dissymétrique, fig. 49, qui sera au plagièdre, fig. 48, ce que le rhomboèdre basé (fig. 47) est au rhomboèdre, fig. 46 : ce sera un *plagièdre basé*. On voit en quoi cette forme de molécule diffère de celle de la molécule rhomboédrique : elle n'est, pour ainsi dire, que cette dernière molécule qui aurait éprouvé une légère distorsion autour de son axe; on peut la considérer comme une molécule rhomboédrique tordue.

Nous ne nous arrêterons pas ici sur une modification de la symétrie, du genre des hémiédries rotatoires horizontales, qui, dans la craïtonite, l'ilménite et autres fers titanés rhomboédriques, paraît donner lieu à des rhomboèdres de position anormale, en réduisant à moitié le nombre des faces de certains dodécaèdres à triangles scalènes ou isoscèles. Mais, celle que l'on observe dans la tourmaline mérite une attention toute particulière. Outre les formes qui caractérisent le système rhomboédrique, on rencontre dans cette espèce d'autres formes qui ne peuvent en faire partie, telles que des prismes droits triangulaires et des pyramides droites à base équilatérale, qui sont des formes

hémiédriques, à l'égard des prismes hexagonaux et des rhomboèdres basés du système rhomboédrique. La modification subie par le type fondamental dans son caractère de symétrie est indiquée par la notation de la figure 95, où l'on voit une distinction entre certains sommets, malgré leur égalité géométrique. A cause de l'indépendance des parties terminales opposées, les rhomboèdres et scalénoèdres se trouveront généralement réduits à la moitié du nombre de leurs faces, mais de manière que toutes les faces situées vers un même sommet disparaîtront à la fois : c'est une hémiédrie polaire, relative seulement à l'axe principal. Quant aux parties latérales, on voit que le prisme hexagonal qui naît sur les arêtes latérales D, se montrera toujours avec toutes ses faces; mais il n'en sera pas de même de celui qui provient de la modification des angles solides latéraux, ou du prisme en position normale. Il sera réduit par l'hémiédrie à la forme de prisme droit triangulaire. La forme représentative de la molécule est le tétraèdre trigonal ou pyramide droite à base équiangle (fig. 51, pl. III), comme je l'ai dit dans le mémoire déjà cité, et qui a pour titre : *Recherches sur la cristallisation.*

Enfin, on conçoit une dernière modification hémiédrique du prisme hexagonal, dans laquelle une distinction s'établirait entre les deux groupes de faces alternatives du prisme, tandis que les parties terminales qui se correspondent sur le même pan resteraient semblables : cette modification donnerait encore un prisme droit triangulaire, mais avec la symétrie représentée fig. 96. Quoiqu'on ait cité de semblables prismes dans une espèce du genre mica, il n'est pas encore prouvé qu'ils existent réellement parmi les espèces minérales connues. Un des dérivés les plus simples de ces prismes triangulaires serait le *di-trièdre*, ou double-pyramide à base triangulaire équilatérale.

TROISIÈME GENRE.

SYSTÈMES TÉTRAGONAUX.

CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUE DES AXES.

UN AXE PRINCIPAL, PERPENDICULAIRE A DEUX AUTRES AXES SECONDAIRES, ÉGAUX ENTRE EUX, ET SE COUPANT A ANGLES DROITS.

Les principaux systèmes qui dérivent d'un prisme tétragonal régulier ou prisme carré droit, sont au nombre de deux, savoir :

le système tétragonal à modifications holoédriques (*système quadratique*), et le système tétragonal à modifications anti-hémiédriques (*système sphénoédrique*).

Ces deux systèmes ont des formes qui sont propres à chacun d'eux, et d'autres qui leur sont communes; mais ces dernières n'ont pas le même caractère de symétrie, et par conséquent ne se modifient pas de la même manière dans les deux systèmes. Toutes ces formes ont d'ailleurs pour caractère commun d'avoir trois axes rectangulaires, dont un vertical *a*, unique en son espèce, et deux autres *b*, *b*, horizontaux et égaux entre eux (fig. 97).

1. SYSTÈME QUADRATIQUE.

CARACTÈRE PHYSIQUE DES AXES.

UN AXE PRINCIPAL ISOPOLAIRE, QUADRILATÉRAL (A^4).

Le nom de *quadratique*, que plusieurs cristallographes ont donné à ce système, vient de la propriété que possèdent toutes les formes qui le composent, d'avoir un axe principal, comme celles du système rhomboédrique, et pour section perpendiculaire à cet axe, un carré, ou une figure symétrique, dans laquelle on peut toujours inscrire un carré.

Les figures 97 et 98 représentent un prisme carré droit choisi pour forme fondamentale; la première, avec la notation qui convient à la symétrie dans le cas des modifications holoédriques. Ce solide a deux bases égales, qui sont des carrés, et quatre pans égaux, qui sont des rectangles. Il a huit angles solides de même espèce, composés de trois faces, dont deux sont égales, et il offre deux sortes d'arêtes, savoir : huit arêtes horizontales B, égales entre elles, et formées par la rencontre de faces inégales; et quatre arêtes verticales C, formées par l'intersection de faces de même espèce.

D'après ces caractères de symétrie, le prisme tétragonal est susceptible de cinq sortes de modifications, savoir : deux sur les angles, deux sur les arêtes verticales, et une seule sur les arêtes horizontales.

Le prisme (fig. 97) peut être modifié sur les angles :

1° *Par une seule facette* coupant également les deux arêtes B de l'angle A, comme on le voit figure 99. Forme dérivée : l'octaèdre quadratique (fig. 100) ou, par abréviation, le *quadroctaèdre*.

Le signe des faces de ce quadroctaèdre est $(ma:b:b)$, ou $a^{\frac{1}{m}}$ (Haüy et Lévy), en admettant que m puisse être entier ou fractionnaire. Tous ces quadroctaèdres, dont les faces occupent des positions semblables à celles de l'octaèdre qui a pour axes a, b et b, sont dits être en position normale. Dans ceux que l'on observe le plus souvent, le coëfficient m a pour valeurs 2, 3, 4, ou bien $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}$.

2° *Par deux facettes* également inclinées sur les pans de part et d'autre de l'arête commune C (fig. 101). Forme dérivée : un *di-octaèdre* à triangles scalènes égaux (fig. 102) : c'est le scalénoèdre du système : car on a pu remarquer, que dans chaque système cristallin, la dernière forme simple, celle qui est donnée par la modification la plus compliquée, est toujours un scalénoèdre.

Le signe général du di-octaèdre est $(ma:nb:b)$; les solides de ce genre que l'on rencontre le plus habituellement sont ceux qui ont pour notation

$$\left(a:\frac{1}{3}b:b\right), \text{ et } \left(\frac{1}{2}a:\frac{1}{3}b:b\right).$$

Le premier se voit dans le zircon, le second dans l'idocrase. Généralement, les di-octaèdres ne se rencontrent point isolés ; leurs faces se montrent ordinairement subordonnées dans les combinaisons avec les quadroctaèdres. Elles acquièrent un développement assez considérable dans les cristaux de la braunite de Saint-Marcel, et dans certains cristaux d'étain oxydé.

Le prisme tétragonal peut être modifié sur les arêtes verticales :

1° *Par une seule facette*, également inclinée sur les deux pans, ou coupant également les arêtes BB, comme figure 103 ; ce qui conduit à un autre prisme carré (fig. 104) en position diagonale avec le premier, c'est-à-dire tourné par rapport à lui de 45° sur son axe. La combinaison des deux prismes donnerait un *prisme octogonal équiangle* (1).

2° *Par deux facettes* formant biseau (fig. 105). Forme dérivée : *prisme octogonal symétrique*, à angles alternativement égaux (fig. 106).

Enfin, le prisme tétragonal peut être modifié sur les arêtes des

(1) Voyez la note de la page 132, qui s'applique à la forme dont il s'agit ici, ainsi qu'au di-octaèdre à triangles isoscèles, dont nous allons bientôt parler.

bases *par une seule facette*, inclinée généralement d'une manière inégale sur la base et sur le pan correspondant (fig. 107). Forme dérivée : second quadroctaèdre (fig. 108), en position diagonale avec celui de la figure 100. La combinaison des deux octaèdres donnerait un *di-octaèdre à triangles isoscèles*.

Si l'on prenait pour forme fondamentale le quadroctaèdre $(b:b:a)$, on pourrait, en plaçant des plans tangents sur ses arêtes culminantes, obtenir le premier terme d'une série d'octaèdres obtus, tangents les uns aux autres, tout-à-fait analogue à la série de rhomboèdres tangents dont il a été question p. 135. On prolongerait de même la série en sens inverse, et à partir de l'octaèdre fondamental, on aurait une suite d'octaèdres de plus en plus aigus. En supposant que tous ces octaèdres aient le même axe principal, leurs bases vont en décroissant, des plus obtus aux plus aigus, suivant la progression

$$.....16:8:4:2:1:\frac{1}{2}:\frac{1}{4}:\frac{1}{8}:\frac{1}{16}.....$$

l'unité représentant la base de l'octaèdre fondamental. Si, dans cette série, on prend seulement les octaèdres qui sont en position normale avec le primitif, les bases de ces octaèdres seront entre elles comme

$$.....16:4:1:\frac{1}{4}:\frac{1}{16}.....$$

et, par conséquent, les axes secondaires seront comme les nombres

$$.....4:2:1:\frac{1}{2}:\frac{1}{4}.....$$

Si, maintenant, on suppose que l'on ait ramené tous ces octaèdres à la condition d'avoir les mêmes axes secondaires, leurs axes principaux seront dans les rapports inverses

$$.....\frac{1}{4}:\frac{1}{2}:1:2:4.....$$

lesquels vont en décroissant des octaèdres plus aigus aux octaèdres plus obtus. Le signe d'un octaèdre de cette classe est

$$(b:b:ma),$$

celui d'un octaèdre en position diagonale est

$$(b:\infty b':ma).$$

Parmi les espèces minérales dont les cristaux se rapportent au système quadratique, et dont le nombre est de trente environ, nous citerons comme exemples le zircon, l'idocrase, la wernérite, l'apophyllite, l'anatase, le rutile, l'oxyde d'étain, l'uranite.

2. SYSTÈME SPHÉNOÉDRIQUE.

Système tétragonal, à modifications anti-hémiédriques.

CARACTÈRE PHYSIQUE DES AXES.

UN AXE PRINCIPAL, ISOPOLAIRE, QUADRILATÉRAL A CÔTÉS ALTERNES ($_2A^2$). FORME REPRÉSENTATIVE DE LA MOLÉCULE : LE SPHÉNOÈDRE, OU TÉTRAÈDRE SYMÉTRIQUE A TRIANGLES ISOSCÈLES.

Dans ce système, les choses se passent comme si l'identité n'avait lieu qu'entre les arêtes alternatives des bases du prisme fondamental (fig. 109), et comme si tout n'était pas semblable à droite et à gauche des arêtes verticales. D'après cela, les modifications simples ne peuvent avoir lieu que par une facette sur les angles et sur les arêtes, et la modification des arêtes B doit se faire indépendamment de celle des arêtes B'.

Si l'on suppose donc les arêtes B modifiées *par une facette*, comme on le voit figure 110, on aura pour forme dérivée un solide composé de quatre triangles isoscèles (fig. 111), auquel on a donné le nom de *sphénoèdre*, ou *sphénoïde tétragonal*. Ce solide a deux sortes d'arêtes, savoir : deux terminales B, et quatre latérales D; et une seule espèce d'angles solides $\dot{A}$, analogues par leur composition aux angles latéraux des rhomboèdres. Si l'on adopte ce solide pour forme fondamentale, on pourra en faire dériver toutes les autres formes du système par des modifications holoédriques, ainsi que la chose a eu lieu pour le rhomboèdre (p. 135).

La modification des angles A (fig. 111), *par une seule facette*, donnera généralement quatre faces, dont l'ensemble formera un sphénoèdre, excepté le cas où les faces seraient parallèles à l'axe: car, on aurait alors les pans d'un prisme tétragonal, dont les bases seraient données par une seconde modification sur les arêtes B. La modification des angles, *par deux facettes*, donnerait pour forme dérivée un *scalénoèdre* tétragonal (fig. 112) composé de huit triangles scalènes égaux. Ce scalénoèdre et le sphé-

noèdre sont les deux seules formes simples qui fassent partie du système : que l'on examine successivement toutes les modifications dont la forme fondamentale (fig. 111) est susceptible, et l'on n'en tirera que des sphénoèdres ou des scalénoèdres en position normale ou diagonale, ou bien l'on obtiendra séparément les bases et les pans de deux prismes tétragonaux, tournés de 45° l'un par rapport à l'autre. Nous ne pousserons pas plus loin l'exposé de ce système, qui suit, comme l'on voit, dans son développement, exactement la même marche que le système rhomboédrique.

Les systèmes cristallins *à un axe principal*, c'est-à-dire les systèmes hexagonaux et tétragonaux, donnent lieu à une observation. Ceux de ces systèmes qui sont produits par des modifications hémiédriques, jouissent de cette propriété, que leurs formes les plus simples, savoir les rhomboèdres et les sphénoèdres, peuvent être reproduites dans deux positions différentes, avec les mêmes valeurs d'angle, en sorte que, par la combinaison des deux formes égales et correspondantes, on peut obtenir une forme pyramidale à base régulière. Deux formes *de même genre* pouvant être aussi reproduites, en positions diagonales, dans les deux systèmes à modifications holoédriques, on peut être porté à croire, par analogie, que là aussi des formes de même espèce, c'est-à-dire de même valeur d'angle, sont pareillement possibles, ainsi que les formes pyramidales à base régulière, qui résulteraient de leur combinaison. Cependant, il n'en est rien, et, dans ce cas, l'analogie est tout-à-fait trompeuse. Nous en avons déjà indiqué la cause : cela tient à ce que, dans la combinaison supposée, les faces de l'une des formes simples couperaient les axes de l'autre forme dans des rapports irrationnels, ce qui est contre la loi générale de la dérivation des faces. Ainsi, cette loi importante ne se borne pas à nous donner les moyens de calculer les formes réellement existantes ; elle a encore l'avantage de nous apprendre quelles sont celles qu'on ne rencontrera jamais, parce qu'elles sont impossibles en vertu des lois mêmes qui régissent la cristallisation.

Le système sphénoédrique ne se rencontre que très-rarement parmi les espèces minérales. La chalkopyrite, parmi les substances métalliques, et l'édingtonite, parmi les substances pierreuses, nous en offrent des exemples.

Le prisme carré droit peut encore admettre d'autres modes de symétrie, conduisant à des modifications hémiédriques, du genre

de celles dont nous avons fait mention (p. 140) à l'occasion du prisme hexagonal. Ainsi, les di-octaèdres peuvent se décomposer en deux trapézoèdres tétragonaux, à faces inclinées, l'un droit et l'autre gauche, comme les di-dodécaèdres se partagent en deux trapézoèdres hexagonaux. La figure 113 représente un solide de ce genre : jusqu'à présent on n'en connaît pas d'exemple dans le règne minéral. Il existe, au contraire, plusieurs substances dont les cristaux ont pour forme principale un octaèdre à base carrée, avec des facettes obliques sur les angles latéraux, mais seulement du côté droit ou du côté gauche, ce qui est l'analogue du cas que nous a offert l'apatite. La figure 114 représente une de ces modifications produites par une hémiédrie rotatoire horizontale. Les petites facettes additionnelles donneraient, si on les prolongeait suffisamment, une forme secondaire à faces parallèles, qui serait un octaèdre à base carrée, de position anormale, c'est-à-dire intermédiaire entre les positions ordinaires des octaèdres du système quadratique. On a des exemples de cette espèce de modification dans les cristaux de schéélite et de ferqusonite.

QUATRIÈME GENRE.

SYSTÈMES ORTHORHOMBIQUES.

CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUE DES AXES.

TROIS AXES INÉGAUX ET RECTANGULAIRES.

Les formes qui composent ces systèmes ont pour caractère commun d'avoir trois axes inégaux perpendiculaires entre eux, entre lesquels on peut choisir arbitrairement celui que l'on placera verticalement, et que l'on considérera comme axe principal. De plus, toute section perpendiculaire à l'un des axes, est toujours un rhombe, ou une figure dans laquelle un rhombe peut être inscrit symétriquement. C'est à cause de cette propriété, et du grand nombre de prismes à base rhombe qui se rencontrent parmi les formes de ces systèmes, qu'on leur a donné le nom de systèmes orthorhombiques ou, par abréviation, celui de systèmes rhombiques.

On connaît trois systèmes qui appartiennent à ce genre : le système rhombique à modifications holoédriques (*système rhom-*

bique proprement dit), et deux systèmes à modifications anti-hémiédriques (*système sphéno-rhombique* et *système pyramido-rhombique).*

I. SYSTÈME RHOMBIQUE.

CARACTÈRE PHYSIQUE DES AXES.

TROIS AXES ISOPOLAIRES, BILATÉRAUX (A^3).

La figure 115 représente un prisme rectangle droit, pris pour forme fondamentale, avec la notation qui lui est propre. Ce prisme a tous ses angles de la même espèce, mais composés de faces inégales. Les arêtes, au contraire, sont de trois sortes différentes, l'identité n'ayant lieu que pour celles qui ont une même direction.

Ce prisme peut être modifié : 1° *par une facette sur chacune des quatre arêtes d'une même espèce*. Si l'on suppose d'abord que la modification ait lieu sur les arêtes verticales D (fig. 117), elle produira quatre facettes, qui, en se combinant avec les deux faces P de la forme fondamentale dont les arêtes sont restées intactes, donneront un *prisme rhomboïdal*, ou mieux, *prisme rhombique droit*, à axe vertical (fig. 118). La même modification opérée sur les arêtes B donnerait un prisme rhomboïdal à axe horizontal et parallèle à B (fig. 119), et la modification des arêtes C, le prisme horizontal (fig. 120). On voit donc qu'il peut résulter de la modification des arêtes, trois prismes rhomboïdaux, qui différeront, non-seulement par les valeurs de leurs angles, mais encore par leurs positions. Deux de ces prismes sont couchés horizontalement, et leurs faces, prises deux à deux, se présentent sous la forme d'un toit. De là le nom de *dômes*, que les cristallographes allemands donnent à ces prismes horizontaux.

Si les modifications des trois groupes d'arêtes, au lieu de se combiner chacune avec deux faces de la forme fondamentale, se combinent deux à deux entre elles, elles produiront trois *octaèdres rectangles droits* (fig. 121, 122, 123), qui auront entre eux les mêmes positions relatives que les trois prismes rhomboïdaux dont nous venons de parler, c'est-à-dire que leurs axes se couperont mutuellement à angles droits. Les cristaux de cette forme, en s'allongeant extraordinairement dans le sens d'un des bords de la base, prennent souvent l'aspect d'un octaèdre cunéiforme

ig. 124), dans lequel les sommets sont remplacés par une arête lus ou moins longue.

2° Le prisme rectangle peut être modifié *par une facette* sur hacun des angles solides (fig. 125); la forme dérivée sera un *:taèdre rhombique droit*, ou *rhomboctaèdre* (fig. 126), composé de uit triangles scalènes égaux. Cet octaèdre est la seule forme omplètement fermée, qui résulte d'une modification simple, ans le système rhombique.

Le nombre des espèces minérales dont les formes se rapporent au système rhombique, monte à plus de quatre-vingts. Nous iterons comme exemples le soufre, la barytine, l'aragonite, la opaze, le péridot, les carbonate et sulfate de plomb.

2. SYSTÈME SPHÉNO-RHOMBIQUE.

ystème rhombique, à hémiédrie rotatoire oblique à l'égard des axes principaux, et hémiédrie polaire relativement aux quatre axes secondaires qui vont aux angles du prisme fondamental.

Le système rhombique ne nous a offert que deux formes imples, savoir : le rhomboctaèdre droit, à faces triangulaires calènes, et le prisme rhombique droit, considéré comme une orme à axe infini, et indépendamment des bases, qui le limitent oujours dans la nature. L'une de ces formes, l'octaèdre rhombique, pouvant se décomposer, comme l'octaèdre du système précédent, en deux solides sphénoïdaux, composés chacun de quatre riangles égaux, il résulte de là que le prisme droit rectangulaire eut donner naissance à un système tétraédrique particulier, un ouveau système à modifications hémiédriques et à faces inclinées. Ce système aurait pour forme caractéristique le *tétraèdre* ou *phénoïde rhombique*, composé de quatre triangles scalènes égaux; t ce tétraèdre représenterait en même temps le polyèdre moléculaire. On ne l'a encore observé que dans une seule espèce ninérale, la manganite; encore y est-il rare et toujours subordonné. Mais nous en trouvons un exemple plus frappant dans es cristaux artificiels du sulfate de magnésie. On doit remarquer ci que les deux tétraèdres conjugués, produits par le dédoublement de l'octaèdre rhombique, offrent une dissymétrie, qui ne eur permet pas d'être superposables l'un à l'autre.

3. SYSTÈME PYRAMIDO-RHOMBIQUE.

Système rhombique, à hémiédrie polaire relativement à un des axes rectangulaires seulement. Forme représentative de la molécule : la pyramide droite à base rectangle ou rhombe.

Les cristaux de silicate de zinc nous offrent un exemple de cette anti-hémiédrie, qui se manifeste par une différence de configuration des sommets aux extrémités de l'axe vertical.

Remarques sur le système rhombique. — Si l'on admettait dans le prisme fondamental la distinction de parties qu'indique la notation de la figure 127, dans laquelle on voit que les huit angles solides ne sont plus identiques que quatre à quatre ; on aurait, dans ce cas, des modifications hémiédriques, et le nombre des faces des octaèdres à base rhombe serait réduit à moitié, ainsi que celui des faces des prismes parallèles à l'arête B. En développant ce système hypothétique, on trouverait que les formes dérivées qui lui appartiennent sont exactement de même genre que celles de l'un des systèmes suivants (le système klinorhombique). Aussi plusieurs cristallographes n'ont pas voulu considérer ce dernier système comme un système à part, mais seulement comme une modification par hémiédrie du système rhombique. Pour légitimer cette manière de voir, il faudrait qu'on pût démontrer, pour chaque espèce klinorhombique, l'existence parmi ses formes d'un prisme semblable à celui de la figure 127, ou, en d'autres termes, la possibilité de les rapporter à trois axes rectangulaires. Or, il s'en faut de beaucoup que cette condition ait été vérifiée pour toutes les espèces connues : elle ne paraît admissible que pour quelques-unes, parmi lesquelles nous citerons le pyroxène et le wolfram.

Si l'on supposait enfin, entre les parties du prisme fondamental, la corrélation marquée par la figure 128, les octaèdres à base rhombe se trouveraient réduits au quart du nombre de leurs faces, et l'on aurait un système rhombique à modifications tétartoédriques, qui ne différerait pas en apparence du système que nous décrirons bientôt sous le nom de *système klinoédrique.*

CINQUIÈME GENRE.

SYSTÈMES KLINORHOMBIQUES.

CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUE DES AXES.

TROIS AXES INÉGAUX, DONT DEUX OBLIQUES L'UN SUR L'AUTRE, ET LE TROISIÈME PERPENDICULAIRE AUX PREMIERS.

Les formes qui composent ce système ont pour caractères communs d'avoir trois axes inégaux, dont deux sont inclinés l'un sur l'autre, tandis qu'ils font un angle droit avec le troisième. On peut prendre indifféremment pour axe vertical l'un ou l'autre des deux premiers; alors toute section faite dans une des formes du système, soit horizontalement, soit dans une direction oblique et parallèle au troisième axe, est un rhombe, ou une figure qui peut toujours être inscrite ou circonscrite à un rhombe.

La figure 129, pl. X, représente un prisme rectangle à base oblique, pris pour forme fondamentale, avec la notation qui lui est propre. Ce prisme a quatre angles solides A d'une espèce, et quatre angles solides B d'une autre espèce, formés chacun de trois faces inégales. Parmi les arêtes, celles qui sont verticales sont identiques entre elles; les quatre arêtes inclinées D sont pareillement égales; les arêtes horizontales B, C, ne sont égales que deux à deux.

D'après ces caractères de symétrie, le prisme dont il s'agit pourra être modifié sur les arêtes G *par une seule facette* (fig. 131) inégalement inclinée sur les faces qu'elle séparera; cette modification, poussée jusqu'à sa limite, donnera le prisme rhombique oblique ou *prisme klinorhombique* (fig. 132). Le même prisme pourra être pareillement modifié par des facettes solitaires sur les arêtes B, sur les arêtes C et sur les arêtes D; chacune de ces modifications aura lieu indépendamment des autres, ou bien elles pourront se montrer toutes ensemble. Dans ce dernier cas, que représente la figure 133, si les modifications atteignent leur limite, on aura pour forme secondaire l'*octaèdre rectangle oblique*, figure 134.

Le prisme rectangle (fig. 129) pourra être modifié *par une seule facette* sur chacun des quatre angles A, ou sur chacun des

angles E : en combinant ces deux sortes de modifications, comme on le voit figure 135, on en déduira pour forme secondaire une autre espèce d'octaèdre oblique (fig. 136), et qui est l'*octaèdre klinorhombique*. Ainsi, dans ce système comme dans le précédent, les formes dominantes les plus simples sont des prismes et des octaèdres à base rectangle ou rhombe, mais la base est constamment oblique, au lieu d'être perpendiculaire aux arêtes longitudinales des prismes, ou aux axes des octaèdres. Aucune de ces formes d'ailleurs n'est simple dans la rigoureuse acception du mot, c'est-à-dire qu'elles sont toutes composées de faces de plusieurs espèces différentes.

Celle de ces formes que l'on prend le plus ordinairement pour type fondamental du système, est le prisme klinorhombique, que la figure 137 représente avec la notation qui lui est propre. C'est l'espèce de parallélipipède que les minéralogistes allemands appellent *hendyoèdre*. Indiquons rapidement les diverses sortes de modifications dont il est susceptible :

1° Chacun des couples d'arêtes G, G, et H, H peut être, indépendamment l'un de l'autre, remplacé par des facettes tangentes *g* et *h*, comme on le voit figure 138 ; la combinaison des bases primitives avec les facettes secondaires *g* et *h* produirait le prisme rectangle oblique. 2° Chacun des mêmes couples d'arêtes peut être modifié par un biseau, figures 139 et 140. Formes dérivées : prismes klinorhombiques. 3° Les arêtes D ou B des bases peuvent être remplacées par une seule facette, comme l'indique la figure 141 ou 142 ; les quatre facettes provenant de l'une de ces modifications donnent les pans d'un prisme rhombique à axe incliné, et la réunion des deux modifications produit un octaèdre klinorhombique, semblable à celui de la figure 136. 4° Les angles solides obtus O, ou les angles aigus A, peuvent être remplacés par une seule facette, faisant une égale incidence sur les deux pans adjacents, figure 143 ou 144. 5° Une modification simple peut encore avoir lieu sur les quatre angles latéraux E, E (fig. 145). Les quatre facettes, données par cette modification, étant combinées avec les pans M, M, produiront un octaèdre droit à axe horizontal et à base parallélogrammique, ou bien en prenant pour axe une des autres diagonales, un octaèdre klinorhombique. 6° Les angles A, ou les angles O, peuvent être remplacés par deux facettes, comme on le voit figures 146 et 147 ; chacune de ces modifications fournit le contour latéral d'un prisme rhombique à axe incliné, et la combinaison de deux pa-

reils prismes reproduirait encore un octaèdre oblique à base rhombe.

On voit par là que les formes élémentaires du système klinorhombique, données par les modifications simples, se réduisent aux deux prismes et aux deux octaèdres que nous avons signalés plus haut.

On ne connaît pas, dans le règne minéral, de cas d'hémiédrie polaire ou rotatoire, se rapportant aux formes du système klinorhombique. Mais, parmi les substances artificielles qu'on a fait cristalliser dans les usines et les laboratoires, on a rencontré des exemples des deux cas d'hémiédrie que nous avons signalés plus haut dans le système orthorhombique. MM. Hankel et Wolff ont reconnu, dans les cristaux de sucre de cannes, une hémiédrie polaire, analogue à celle que présentent les cristaux du silicate de zinc, mais relative à l'axe horizontal. M. Pasteur a observé une hémiédrie rotatoire, semblable à celle du système sphénorhombique, dans les cristaux d'acide tartrique et de divers tartrates. Le sphénoïde klinorhombique, qui est le résultat de cette hémiédrie, est encore un tétraèdre à triangles scalènes, mais qui diffère du sphénoïde orthorhombique, en ce que ses axes ne sont pas tous rectangulaires entre eux. Les deux tétraèdres complémentaires sont dissymétriques, et non superposables l'un à l'autre.

Le nombre des espèces minérales, dont les formes se rapportent au système klinorhombique, est de plus de cinquante, parmi lesquelles nous citerons le gypse, l'épidote, l'euclase, les pyroxènes, les amphiboles, le cuivre azurite, l'arsénic réalgar.

SIXIÈME GENRE.

SYSTÈMES KLINOÉDRIQUES.

CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUE DES AXES.

TROIS AXES INÉGAUX ET OBLIQUES.

Dans le système précédent, les prismes et les octaèdres avaient tous un caractère commun, qui consistait en ce que les axes étaient obliques relativement aux bases, ou réciproquement. Mais là l'obliquité se présentait d'une manière plus simple que dans les prismes et les octaèdres qui appartiennent au dernier système qu'il nous reste à développer. Si l'on détermine en effet la

position de l'axe relativement à la base, dans les deux sections diagonales pour les prismes et les octaèdres à base rhombe, et dans les deux sections parallèles aux pans pour les prismes et octaèdres à base rectangle, il arrivera constamment que dans l'une des deux sections l'obliquité sera nulle. Pour les formes analogues du dernier système, l'obliquité est en quelque sorte double, en ce qu'elle a lieu à la fois dans les deux sections principales que nous venons d'indiquer. De là le nom de *prismes* ou d'*octaèdres doublement obliques*, sous lequel les cristallographes anglais désignent communément ces formes, et que pour abréger nous transformerons en celui de *prismes* ou d'*octaèdres bi-obliques*.

Dans les prismes et octaèdres bi-obliques, on doit distinguer la *base*, qui est toujours inclinée à l'axe supposé vertical, et la *section transverse*, que l'on peut concevoir menée perpendiculairement à cet axe. De ces deux quadrilatères, l'un est toujours un parallélogramme ; l'autre présente aussi généralement cette figure, mais dans certains cas particuliers, il peut devenir un rhombe ou un rectangle, sans que pour cela le solide fondamental subisse aucun changement réel dans la symétrie qui le caractérise. Il résulte seulement de cette circonstance des propriétés géométriques, qui rendent plus simple la détermination du système, et qui peuvent aussi influer sur l'aspect général des combinaisons, de manière à faire croire à une modification de la symétrie, mais cette modification n'est qu'apparente. Nous considérerons ici ces cas particuliers, indépendamment du cas général, mais nous éviterons de les ériger en systèmes distincts de cristallisation, comme l'ont fait quelques cristallographes allemands.

Dans chacun des systèmes que nous avons développés, on peut toujours choisir pour type fondamental une forme octaédrique ou pyramidale, susceptible d'être déterminée complètement par de simples données de l'observation, c'est-à-dire par les indications de la symétrie, combinées avec les mesures d'angles. Dans les systèmes cubiques, la symétrie seule suffit, et il n'est besoin d'aucune donnée angulaire. Dans les systèmeshexagonaux et quadratiques, il ne faut connaître qu'un seul angle, pour pouvoir déterminer complètement le solide fondamental. Dans le système rhombique, *deux* éléments de détermination, c'est-à-dire deux mesures d'angle sont nécessaires ; il en faut *trois* dans le système klinorhombique, et généralement *cinq* dans

le système klinoédrique. Mais ces cinq éléments se réduisent à quatre dans deux cas particuliers, savoir : celui dans lequel les formes simples, que l'on peut prendre pour formes fondamentales, sont des prismes ou octaèdres bi-obliques à base rhombe ou rectangle, et celui dans lequel ces formes sont des prismes ou octaèdres bi-obliques à section transverse, rhombe ou rectangle. Après ces deux cas, vient le cas général, dans lequel les bases et sections transverses des formes fondamentales sont toutes des parallélogrammes.

SYSTÈME KLINOÉDRIQUE.

CARACTÈRE PHYSIQUE DES AXES.

TROIS AXES INÉGAUX, A QUATRE COTÉS DISSEMBLABLES.

D'après les relations particulières que peuvent présenter les valeurs des inclinaisons, soit des axes entre eux, soit des plans qu'ils déterminent, on peut distinguer trois cas différents qui produisent, dans la symétrie des formes du système, des modifications bien plus apparentes que réelle; elles constitueront pour nous des variétés du système klinoédrique.

I. *Di-klinoédrique* (deux des sections principales perpendiculaires, et les trois axes obliques).

Formes caractéristiques : le *prisme bi-oblique* à base parallélogramme, et à section transverse rhombe ou rectangle (fig. 148 et 149). Système particulier de Mitscherlich.

La symétrie réelle est, dans ce cas particulier, ce qu'elle est dans le cas général; ainsi, chaque arête latérale G ou H peut, à la rigueur, n'être modifiée que par une seule facette; mais elle pourra aussi, par des modifications conjuguées, être remplacée par deux facettes, qui produiront en apparence le même effet que le biseau qui prend naissance sur les arêtes des prismes obliques ordinaires, en sorte que les cristaux présenteront, dans ce cas, le même contour latéral que ceux du système klinorhombique, tandis qu'ils en différeront par la configuration de leurs sommets. Ce cas a été observé par M. Mitscherlich dans les cristaux artificiels de l'hyposulfite de chaux, et peut-être pourrait-on en voir un autre exemple dans les cristaux du feldspath orthose, si, avec Haüy, on voulait rapporter ces cristaux au

dernier système cristallin. Le prisme, fig. 148, peut, par des modifications simples, se changer en un octaèdre bi-oblique à base parallélogramme (fig. 150), dans lequel les deux sections diagonales seront perpendiculaires l'une sur l'autre.

II. *Tri-klinoédrique* (les trois sections principales, obliques chacune sur les deux autres).

1° Di-klinométrique, Naumann (deux axes rectangulaires entre eux, et obliques sur le troisième). Formes caractéristiques : *prisme bi-oblique à base rhombe ou rectangle, et à section transverse parallélogrammique*. Ce cas correspond au système hémi-anorthotype de Mohs.

La figure 151 représente le prisme bi-oblique à base rhombe avec la notation qui lui est propre. La base, malgré l'égalité de longueur de ses côtés, doit être considérée comme ayant le caractère du parallélogramme, les angles dièdres en B, C, D, F n'ayant pas la même valeur. La symétrie est donc encore la même que si la base était réellement parallélogrammique. Ce prisme bi-oblique à base rhombe peut, par des modifications simples sur les arêtes latérales, se transformer en un prisme bi-oblique à base rectangle (fig. 152); le même prisme, par la modification des arêtes des bases, donnerait un octaèdre bi-oblique à base rhombe (fig. 153).

2° Tri-klinométrique, Naumann (les trois axes obliques, chacun sur les deux autres). Système anorthotype de Mohs. Formes ordinaires : *prismes et octaèdres bi-obliques, à bases et sections transverses parallélogrammiques*.

La figure 154 représente le prisme bi-oblique avec sa notation, et la figure 155 l'octaèdre bi-oblique auquel passe le premier par la modification de chacune des arêtes non verticales. Le prisme bi-oblique n'ayant de parties identiques que celles qui sont directement opposées l'une à l'autre, n'est susceptible que de modifications simples, produisant chacune un couple de faces parallèles (*voyez* fig. 156, 157, 158 et 159). En combinant ces modifications trois à trois ou quatre à quatre, on n'obtient que des prismes ou des octaèdres bi-obliques et irréguliers. Le nombre des espèces minérales dont les formes se rapportent au système klinoédrique, est de dix au plus, parmi lesquelles nous citerons l'albite, le labrador, le disthène, l'axinite, le sulfate de cuivre.

CLASSIFICATION DES SYSTÈMES CRISTALLINS.

Les cristallographes qui, à l'exemple de Weiss, ont fondé la distinction des groupes naturels de formes cristallines sur les axes, n'ont considéré dans ceux-ci que les différences purement géométriques de longueur et d'inclinaison; et, en procédant ainsi, ils ont été conduits à n'admettre que six systèmes cristallins. Nous avons montré que des assemblages d'axes, parfaitement identiques sous le rapport géométrique, pouvaient différer (non dans la même espèce minérale, mais bien d'une espèce à une autre), par leurs propriétés physiques, ces axes n'étant en réalité que des files moléculaires qui ont une structure et une forme déterminées, provenant de la forme et de la structure des molécules elles-mêmes. Il en résulte, dans la polarité de ces axes, des changements qui exercent une influence bien marquée sur la configuration extérieure du cristal, en établissant diversement les rapports d'identité ou de non identité de ses parties, et en produisant à leur tour des modifications particulières dans la symétrie générale. Ces modifications ont pour effet d'introduire dans la série quelques formes nouvelles, savoir : des formes hémiédriques, et en même temps d'altérer profondément la structure des autres formes, qui conservent l'apparence holoédrique. Tout changement dans la symétrie entraîne donc un changement de système, puisqu'il modifie l'ensemble des formes qui peuvent coexister dans une même espèce, et la distinction réelle des systèmes doit s'établir, non pas seulement d'après le rapport géométrique des axes, comme on l'a fait jusqu'ici, mais encore d'après leurs relations physiques, ou d'après les caractères particuliers qu'imprime à ces systèmes l'absence ou la présence de telles ou telles formes hémiédriques.

Si le fait de l'hémiédrie n'existait pas, c'est-à-dire si dans toutes les formes cristallines les parties extérieures, qui sont géométriquement égales, étaient toujours physiquement identiques, et, par conséquent, toujours modifiables ensemble et de la même manière, il n'y aurait que six systèmes cristallins, parce qu'il n'y a que six combinaisons d'axes géométriquement différentes. Mais, à cause des cas d'hémiédrie reconnus et dûment constatés, il existe en réalité un plus grand nombre de systèmes, qui, selon nous, doivent être considérés comme autant d'espèces distinctes

dans le tableau général que nous allons présenter, et qui a pour but de résumer tout ce qui précède. Toutefois, pour nous écarter le moins possible de la classification généralement admise, et, en quelque sorte, consacrée par l'usage, pour la conserver au moins en apparence, nous distinguerons d'abord six systèmes, comme la plupart des cristallographes, en réunissant ensemble toutes les formes qui possèdent les mêmes axes géométriques; et, pour tenir compte ensuite de la valeur que nous avons attribuée précédemment à ces premiers groupes, en les regardant comme des genres, nous indiquerons la subdivision de chacun en plusieurs systèmes connexes ou subordonnés, en mettant en tête comme système principal, celui dont toutes les formes sont holoédriques, et plaçant à la suite, comme systèmes secondaires ou sous-systèmes, ceux qui, outre les formes d'apparence holoédrique, comprendront des formes particulières, engendrées par tel ou tel mode d'hémiédrie. Enfin, pour ne pas trop compliquer ce tableau, nous n'y ferons figurer que les systèmes dont les espèces minérales pourront nous offrir des exemples (1).

(1) Je suis heureux de me trouver d'accord presque sur tous les points avec M. Leymerie, en ce qui concerne l'hémiédrie et la classification des systèmes. (Voir le *Mémoire sur l'hémiédrie*, publié par ce savant professeur dans les *Actes de la Société Linnéenne de Bordeaux*, t. XXI.)

TABLEAU DES SYSTÈMES CRISTALLINS.

	NOMS DES SYSTÈMES.	FORMES FONDAMENTALES OU CARACTÉRISTIQUES.	EXEMPLES TIRÉS DU RÈGNE MINÉRAL.
A	I. SYSTÈME CUBIQUE OU RÉGULIER.		
	Caractère géométrique : trois axes égaux et rectangulaires.		
	α. à formes holoédriques.		
	1. *Système cubique* principal ou proprement dit.. . .	Cube — octaèdre régulier.	la galène.
	β. à formes hémiédriques.		
	2. *Système tétraédrique*, à hémiédrie polaire.	Tétraèdre régulier. . .	la blende.
	3. *Système hexa-diédrique.*	Hexa-dièdre ou dodécaèdre pentagonal. .	la pyrite de fer.

NOMS DES SYSTÈMES.	FORMES FONDAMENTALES OU CARACTÉRISTIQUES.	EXEMPLES TIRÉS DU RÈGNE MINÉRAL.
II. SYSTÈME RHOMBOÉDRIQUE OU HEXAGONAL.		
Caractère géométrique : un axe principal, perpendiculaire à trois axes secondaires, égaux et se coupant sous des angles de 60°.		
α. à formes holoédriques.		
1. *Système di-rhomboédrique*.	Prisme hexagonal régulier, et di-hexaèdre	l'émeraude.
β. à formes hémiédriques.		
2. *Le même*, avec hémiédrie rotatoire horizontale.. . . .	Prisme hexagonal et di-hexaèdre de position anormale. . . .	l'apatite.
3. *Système rhomboédrique* proprement dit..	Rhomboèdre..	le calcaire.
4. *Le même*, avec hémiédrie rotatoire oblique. . . .	Plagièdre ou trapézoèdre trigonal..	le quarz.
5. *Le même*, avec hémiédrie rotatoire horizontale.. .	Rhomboèdre de position anormale. . . .	l'ilménite.
6. *Le même*, avec hémiédrie polaire.	Pyramide droite à base triéquiangle.	la tourmaline.
III. SYSTÈME QUADRATIQUE OU TÉTRAGONAL.		
Caractère géométrique : un axe principal, et deux axes secondaires égaux.		
α. à formes holoédriques.		
1. *Système quadratique* proprement dit.	Prisme quadratique et quadroctaèdre. . . .	le zircon.
β. à formes hémiédriques.		
2. *Le même*, avec hémiédrie rotatoire horizontale.. . . .	Prisme et octaèdre quadratiques de position anormale.. . .	la schéelite.
3. *Système sphénoédrique*, à hémiédrie polaire.	Sphénoèdre.	la pyrite de cuivre.

NOMS DES SYSTÈMES.	FORMES FONDAMENTALES ou CARACTÉRISTIQUES.	EXEMPLES TI du RÈGNE MINÉR
IV. SYSTÈME ORTHORHOMBIQUE.		
Caractère géométrique : trois axes inégaux et rectangulaires.		
α. à formes holoédriques.		
1. *Système rhombique* proprement dit.	Le prisme rhombique droit et le rhomb-octaèdre.	la topaze.
β. à formes hémiédriques.		
2. *Système sphéno-rhombique*, avec hémiédrie polaire et rotatoire..	Sphénoïde rhombique	la manganite
3. *Système pyramido-rhombique*, avec hémiédrie polaire seulement.	Pyramide droite à base rhombe..	le silicate de zinc.
V. SYSTÈME KLINORHOMBIQUE.		
Caractère géométrique : trois axes inégaux, dont deux obliques entre eux, et le troisième perpendiculaire aux deux autres.		
α. à formes holoédriques.		
1. *Système klinorhombique* proprement dit..	Le prisme et l'octaèdre klinorhombique. . .	le pyroxène

C

	NOMS DES SYSTÈMES.	FORMES FONDAMENTALES ou CARACTÉRISTIQUES.	EXEMPLES TIRÉS du RÈGNE MINÉRAL.
C	VI. SYSTÈME KLINOÉDRIQUE.		
	Caractère géométrique : trois axes inégaux et obliques.		
	a. à formes holoédriques.		
	1. *Système klinoédrique.*		
	— Variété di-klinoédrique.	Prisme biobliqueà section rhombique ou rectangle, — octaèdre bioblique à base parallélogramme. . . .	L'orthose?
	— Variété tri-klinoédrique : 1° Deux axes perpendiculaires entre eux.	Prisme et octaèdre biobliques à base rhombe.	certains feld-spaths.
	2° Les trois axes obliques. .	Prisme et octaèdre biobliques à baso parallélogramme	l'axinite; le sulfate de cuivre.

REMARQUES SUR LA CLASSIFICATION PRÉCÉDENTE.

§ 1. *Des caractères généraux de la symétrie.*

Chacun des six systèmes principaux, inscrits dans le tableau qui précède, a un caractère géométrique, tiré du nombre de ses axes et de leur rapport général de longueur. Ce caractère géométrique est empreint dans tous les cristaux d'un même système; il se reconnaît généralement et aisément dans chacun d'eux, lorsqu'on porte son attention sur son contour latéral et sur ses sommets, afin d'observer la répartition des divers *membres* ou parties de forme extérieure, et de saisir la loi de répétition des membres semblables. Ainsi, dans le système hexagonal, où il y a un axe principal et trois axes secondaires égaux, les membres égaux sont toujours répétés six par six autour de l'axe vertical : c'est, selon le langage de Weiss, un système à six membres (sechsgliedriges System). Dans le système quadratique, la répétition des membres a lieu quatre par quatre (viergliedriges Sys-

tem). Elle a lieu de la même manière autour de chacun des axes du système cubique, en sorte que les cristaux de ce système peuvent prendre successivement trois positions différentes autour de leur centre, sans changer d'aspect à l'égard d'un observateur immobile; et à cause de cette égalité des membres autour des trois axes, on a donné à ce système le nom de gleichgliedrige System (Weiss). Dans le système rhombique, les membres se répètent deux par deux autour de l'axe vertical (zwey-und-zweygliedrige System, Weiss); c'est-à-dire que, si nous orientons convenablement le cristal, à l'égard des parties de notre propre corps, de manière que nous puissions distinguer en lui, par analogie, quatre côtés sous les noms de droite et de gauche, d'avant et d'arrière, on trouvera toujours que, si la droite et la gauche se ressemblent par leur configuration, il en sera de même aussi de l'avant et de l'arrière : mais les membres qui correspondront à ces deux derniers côtés, différeront de ceux qui correspondront aux premiers. Dans le système klinorhombique, la droite et la gauche du cristal seront encore semblables, mais l'avant différera de l'arrière, et ces deux côtés en même temps seront distincts des deux autres. Dans ce système, les membres sont répartis par deux, un et un (zwey-und-eingliedrige System, Weiss). Enfin, dans le dernier système, les membres sont ordonnés un par un seulement (ein-und-eingliedrige System, Weiss).

Ces caractères de symétrie sont généralement assez manifestes pour qu'on ne puisse se méprendre sur le système auquel on doit rapporter un cristal, dont on a déterminé la forme, non pas à la simple vue, mais par la mesure et la comparaison de ses angles dièdres. Cependant, les deux derniers systèmes peuvent donner lieu ici à une remarque importante. Il peut arriver que, par suite de relations géométriques particulières entre les axes, qu'on ne rencontre qu'accidentellement dans les formes fondamentales, on observe dans quelques-unes de leurs formes secondaires, un changement apparent dans la symétrie soit des prismes, soit de leurs sommets; les différences de côtés que nous venons de signaler comme générales, peuvent s'effacer dans certains cas, et faire croire à une sorte de passage à une symétrie plus simple; il en résulte dans le cristal un aspect trompeur, qui peut le faire rapporter à l'un des systèmes qui, dans la classification générale, précédait celui auquel il appartient réellement. Il est possible, par exemple, de rencontrer dans certains

cristaux du système klinorhombique, des sommets semblables en apparence à ceux du système orthorhombique; de trouver parfois, dans quelques cristaux du dernier système, des prismes dont le contour latéral rappelle la symétrie du système précédent, tandis que leurs terminaisons sont celles qui caractérisent le système klinoédrique. Le premier de ces cas a été observé par Haüy dans le pyroxène, où, par suite d'une propriété géométrique particulière que présente le prisme klinorhombique fondamental, deux modifications *conjuguées*, mais dont l'existence simultanée n'est pas rigoureusement nécessaire, agissent l'une sur l'angle antérieur, et l'autre sur le postérieur, de manière à produire des faces également inclinées sur l'axe en sens contraires. Il en résulte que la différence de l'avant avec l'arrière s'évanouit, et que les sommets dans ce cas s'assimilent à ceux du système orthorhombique. Cependant, la véritable symétrie, celle qui se fonde sur les caractères de structure moléculaire et cristalline, subsiste toujours, comme le prouve le clivage. D'ailleurs, ce changement apparent de configuration n'a lieu que dans quelques formes seulement de la nombreuse série cristalline; il n'y a donc pas changement de système. Aussi, malgré cette trompeuse analogie dans la forme extérieure, Haüy et tous les cristallographes n'ont pas hésité à rapporter ces formes insolites du pyroxène au système klinorhombique. La possibilité du cas dont il s'agit dépend d'une propriété géométrique particulière, qui consiste en ce que la perpendiculaire, menée dans le prisme klinorhombique, de l'angle inférieur de la base sur l'arête opposée qui passe par l'angle supérieur, doit détacher de cette arête un segment qui soit dans un rapport simple et rationnel avec l'arête entière.

C'est sans doute une circonstance analogue que M. Mitscherlich a rencontrée dans les cristaux artificiels de l'hyposulfite de chaux. Ici, ce ne sont pas les sommets qui prennent un aspect plus simple, mais le contour des prismes; les sommets offrent la symétrie propre au dernier système: mais les prismes présentent dans leurs formes simples, comme dans leurs modifications, l'apparence de ceux du cinquième système, et cela très-probablement, parce que les deux sections principales qui passent par l'axe du prisme fondamental, étant à angles droits, il devient possible que des modifications *conjuguées* produisent à droite et à gauche de chaque arête verticale, des faces dont l'effet apparent soit le même, comme Haüy l'avait déjà montré pour les

cristaux d'orthose, rapportés par lui au dernier système, malgré l'analogie de leurs contours prismatiques avec ceux qui sont propres aux cristaux du système précédent.

Lorsque cette observation de M. Mitscherlich a été publiée, on a vu dans ce fait la découverte d'un nouveau système cristallin, d'un septième système pour ceux des cristallographes qui n'en reconnaissaient que six, nouveau système qui, par la symétrie, semblait être intermédiaire entre le cinquième et le sixième, c'est-à-dire entre le klinorhombique et le klinoédrique : car, les cristaux d'hyposulfite de chaux s'assimilaient par leur contour latéral à ceux du système klinorhombique, et par leurs sommets à ceux du dernier système. Mais la première assimilation n'est encore ici qu'apparente, et doit être considérée comme le résultat de modifications conjuguées; et la véritable symétrie subsiste, celle qui est propre au système klinoédrique même. En admettant que la section transverse soit réellement un rhombe, les arêtes longitudinales n'auraient pas, rigoureusement parlant, la symétrie binaire, à cause de l'inégale inclinaison de la base sur les deux pans adjacents du prisme. Mais il peut se faire qu'au point de vue physique, l'influence de cette inégalité soit assez faible, pour que ces deux pans puissent être considérés comme presque identiques, bien qu'ils ne le soient pas d'une manière absolue, et que, si l'action de l'un d'eux détermine la production d'une facette, l'autre aussi produise de son côté un effet équivalent, de telle sorte que les deux modifications s'accompagnent toujours, quoique à la rigueur elles soient indépendantes l'une de l'autre (1).

(1) M. Naumann, dans ses nouveaux *Eléments de Cristallographie théorique*, insiste sur le maintien du système de Mitscherlich comme système particulier, et pour établir son individualité il se fonde sur la définition donnée par lui des systèmes cristallins, définition dans laquelle il fait entrer, non-seulement la considération du nombre des *axes* et de leurs rapports généraux d'inclinaison et de longueur, mais de plus le rapport général d'inclinaison des *plans coordonnés* que déterminent ces axes par leur combinaison deux à deux. Les différences de classement qu'on observe, à l'égard des systèmes cristallins, chez quelques auteurs, tiennent aux points de vue divers sous lesquels ils envisagent ces systèmes. Au reste, je crois avoir suffisamment indiqué, dans ce qui précède, les caractères propres au système dit de Mitscherlich, en lui donnant, comme variété principale, la place qu'il occuperait comme espèce, entre le système klinorhombique et le klinoédrique proprement dit.

§ 2. *De la prédominance du système rhomboédrique parmi les systèmes hexagonaux.*

Dans les six systèmes cristallins, si l'on vient à les considérer comme genres, ainsi que nous avons proposé de le faire, en distinguant séparément le cas de l'holoédrie et les divers cas d'hémiédrie connus, on remarque qu'en général, pour chaque genre, les espèces à formes holoédriques sont incomparablement plus nombreuses que celles dans lesquelles on rencontre l'hémiédrie; celles-ci sont si rares, qu'elles constituent comme des cas exceptionnels. C'est ce qui a lieu dans le premier système et dans les quatre derniers. Mais le système hexagonal présente une circonstance singulière : ici l'exception devient la règle. On ne connaît qu'un bien petit nombre de minéraux qui cristallisent dans ce genre de système, sous des formes purement holoédriques, et le nombre de ceux qui cristallisent en rhomboèdre, forme hémiédrique à l'égard de la double pyramide hexagonale, est au contraire très-considérable. Cela paraît tenir à ce que, si le prisme hexagonal régulier peut donner naissance au rhomboèdre par un changement de structure dans la molécule, et en conservant d'ailleurs le même réseau cristallin que dans le cas de l'holoédrie, c'est-à-dire un réseau formé de mailles prismatiques triangulaires, le rhomboèdre peut aussi résulter directement d'un autre réseau cristallin, beaucoup plus simple, savoir : le réseau à mailles rhomboédriques. Cette différence de réseau provient sans doute de ce que les molécules physiques ont, dans ce cas, la forme et la symétrie qu'exprime le rhomboèdre, et qu'alors l'arrangement en réseau rhomboédrique se trouve être le plus favorable à l'équilibre moléculaire. Cette différence constitue un nouveau *mode* de cristallisation dans le système hexagonal, en appelant de ce nom, avec M. Bravais, tout changement qui peut avoir lieu dans la particule intégrante ou le parallélipipède générateur du réseau, avec conservation du même système général de lignes droites et de plans, du moins tant qu'on ne tient compte que de leurs positions relatives (1).

(1) La circonstance dont il vient d'être question avait porté M. Bravais à considérer le système rhomboédrique comme un système à part, en sorte qu'il a proposé d'élever à sept le nombre des systèmes généraux réellement distincts (voir ses *Études Cristallographiques*, déjà citées). Mais les autres systèmes cristallins donnent également lieu à de pareilles distinctions de modes, comme il l'a fait voir le premier, et comme nous le montrerons plus loin dans cet ou-

Pour maintenir ici l'analogie avec les autres systèmes, on devrait, non-seulement placer en tête du groupe hexagonal le système holoédrique, mais le considérer comme le système principal, dont les autres sont censés tirer leur origine, et lui donner un nom distinct et caractéristique, comme celui de *di-hexaédrique*, par exemple, par lequel je l'avais désigné dans ma *Classification des Systèmes*, de 1840 (1). Mais, à cause de ce renversement dans l'ordre ordinaire des choses, qui attire en ce moment notre attention, c'est le système rhomboédrique que l'on regarde généralement comme étant le principal système du genre; et, au lieu de le faire dériver par hémiédrie du système hexagonal proprement dit, on a eu l'idée d'en déduire celui-ci par le procédé contraire, par diploédrie ou par doublement de formes rhomboédriques (2). Nous avons cru devoir maintenir dans la classification générale la subordination des deux systèmes, telle que l'établissent les caractères géométriques; toutefois, pour tenir compte de la prédominance effective du second système sur le premier, ce sera lui qui donnera son nom au genre tout entier; seulement, la particule *di*, placée devant ce nom, servira à différencier le système à formes holoédriques (ou, si l'on veut, diploédriques).

§ 3. *Des relations qui existent entre les systèmes cristallins et diverses propriétés physiques.*

Si l'on examine attentivement le tableau général des systèmes que nous avons donné ci-dessus, on remarquera qu'il offre, par le moyen des accolades qui embrassent un certain nombre de ces systèmes, un nouveau mode de groupement et de partage, qui n'est pas sans intérêt, parce qu'il concorde parfaitement avec les divisions que les physiciens ont été conduits, par leurs propres recherches, à établir entre les substances cristallisées, surtout ceux qui se sont occupés des caractères optiques des minéraux. Les systèmes cristallins peuvent être rangés en trois groupes, qui présentent des caractères bien tranchés :

Dans le premier groupe, comprenant seulement le genre cu-

vrage, à l'article de la structure, où nous traiterons des *modes* ou différences de réseau qui peuvent exister dans le même système.

(1) *Thèse sur la Structure des Cristaux*, p. 42.

(2) Voyez le *Handbuch der Mineralogie*, de W. Haidinger, p. 124. Vienne, 1845.

bique, il n'y a point d'axe principal se distinguant des autres, mais trois axes égaux, remplissant exactement le même rôle. Les cristaux qui s'y rapportent, quand ils sont transparents, ne présentent jamais que la réfraction simple : ils ne font pas subir aux rayons de lumière le genre d'action qui produit ce que nous appellerons bientôt le phénomène de la double réfraction.

Un second groupe se compose des systèmes rhomboédrique et quadratique, dont le caractère commun est d'avoir toujours un *axe principal,* unique en son espèce, avec deux ou trois axes secondaires, égaux entre eux. Tout, dans le cristal, se montre disposé avec une symétrie parfaite autour de cet axe principal. Les cristaux qui rentrent dans ce groupe, présentent toujours l'espèce de double réfraction qu'on appelle la *double réfraction à un axe optique* (voir plus loin les caractères optiques des minéraux).

Un troisième groupe se compose des trois derniers systèmes cristallins, dont le caractère commun est d'avoir trois axes inégaux, sans axe principal. Les cristaux qui s'y rapportent offrent toujours un autre genre de double réfraction, qu'on appelle la *double réfraction à deux axes optiques.*

Mais ces rapports entre les systèmes cristallins et les propriétés physiques, n'existent pas seulement pour les six genres ou les six systèmes principaux ; ils se manifestent encore jusque dans les espèces ou les sous-systèmes fondés sur les modifications secondaires de la symétrie, c'est-à-dire sur les différents modes d'hémiédrie. Parmi ces modes d'hémiédrie, il en est deux surtout qui se montrent presque toujours accompagnés de propriétés physiques particulières, évidemment liées au genre de forme moléculaire et de structure cristalline, qui est la cause même de l'hémiédrie. Ce sont ceux que nous avons indiqués dans le tableau général, par les noms d'*hémiédrie rotatoire,* et d'*hémiédrie polaire.* A la première sorte d'hémiédrie se rattache le phénomène optique de la *polarisation rotatoire*, ou *circulaire ;* à la seconde espèce d'hémiédrie, le phénomène de la *pyro-électricité polaire.*

§ 4. *La cause physique et l'explication naturelle de l'hémiédrie doivent être cherchées dans la forme et la structure des molécules cristallines.*

Cet accord constant que l'on observe entre les différences des systèmes, tant principaux que secondaires, et les changements

qui leur correspondent dans les propriétés physiques, est pleinement confirmatif des vues que nous avons exposées précédemment, touchant la véritable nature de l'hémiédrie. Il devient évident que les modifications hémiédriques ne sont pas accidentelles, et qu'elles ont leur raison d'être et leur cause première dans la constitution moléculaire et la structure du cristal. Les formes hémiédriques ne peuvent plus être considérées comme de simples variétés ou modifications purement extérieures des formes cristallines : chaque cas particulier d'hémiédrie est l'indice certain d'un changement dans le degré de la symétrie, et par conséquent détermine un nouveau système, lié sans doute par des rapports géométriques au système principal, mais s'en distinguant au fond par des différences de structure. Ces changements dans la symétrie sont toujours la conséquence de changements préexistants dans la forme des molécules et dans le caractère de polarité qu'elle imprime aux axes, caractère que révèle tout d'abord la marche habituelle des modifications, et qui se trouve ensuite confirmé par l'étude des propriétés physiques.

Je dois faire remarquer en outre que l'hémiédrie ne consiste pas toujours, comme on semble le croire, dans le fait d'une forme entière et fermée, qui se dédouble en deux autres formes pareillement closes; on doit voir en elle un phénomène plus général, qui se rapporte primitivement à l'un des axes de cristallisation, et qui ne se reproduit ensuite dans d'autres directions, qu'autant que cet axe a des analogues. Cette répétition a lieu toujours dans le premier système, et fréquemment dans les deux suivants; mais cela tient à ce que, dans ces systèmes, il y a toujours plusieurs axes qui sont égaux entre eux. Dans les autres systèmes, et quelquefois même dans le second ou le troisième, il peut y avoir hémiédrie, sans dédoublement d'une forme en deux autres fermées : il suffit qu'il y ait partage ou réduction à moitié dans le système de faces, quel qu'il soit, qui se produirait aux extrémités ou sur les côtés de l'axe par une modification holoédrique : ce système n'est parfois qu'un simple couple de faces, comme on le voit dans la tourmaline. On a voulu voir dans l'hémiédrie, qui atteint les modifications des sommets, en plusieurs cristaux de cette substance, comme en ceux du silicate de zinc, un phénomène différent de l'hémiédrie ordinaire, et on lui a donné le nom particulier d'*hémimorphisme*. Pour nous, nous ne voyons dans le cas de la tourmaline qu'une hé-

miédrie tout-à-fait comparable à celle des cristaux de la boracite, si ce n'est que, dans la première substance, le phénomène n'a lieu que pour un axe, tandis que, dans la seconde, il se répète en quatre sens différents.

L'explication que nous avons donnée de l'hémiédrie, est aussi simple que générale. Il suffit, pour se rendre compte d'un système quelconque de formes, au nombre desquelles il s'en trouve qui sont visiblement marquées du caractère hémiédrique, de choisir la plus simple parmi ces dernières, pour représenter la molécule du cristal, et de composer ensuite le réseau cristallin de pareilles molécules (1). Ces molécules transmettront leur symétrie, qui n'est autre ici que celle de la forme géométrique elle-même, aux files moléculaires d'abord, puis à la masse interne du cristal, et enfin aux formes qui le limiteront à l'extérieur.

On pourrait aussi rendre compte des divers cas d'hémiédrie, en conservant à la molécule du cristal la forme holoédrique, et en modifiant seulement sa structure ou composition atomique, comme je l'ai fait voir pour les cristaux de boracite, de tourmaline et de quarz, dans le Mémoire que j'ai présenté à l'Académie des Sciences en 1840. Dans la boracite, par exemple, les angles solides du cube fondamental n'étant identiques physiquement que quatre à quatre, il faudra qu'il en soit de même de la molécule, si on se la représente sous la même forme; ainsi, cette molécule aura quatre de ses sommets occupés par des atomes d'une certaine nature, et les quatre autres par des atomes de nature différente, comme le montre la figure 52, pl. III; elle fait voir en même temps que si ces quatre derniers sommets restaient vides de toute matière pondérable, on retomberait sur la forme tétraédrique, qui serait parfaitement équivalente au cube précédent, et que nous avons admise de préférence, parce qu'elle est plus simple et qu'elle exprime la véritable symétrie par sa configuration même. La figure 52 montre encore qu'un cube moléculaire, construit de la façon que nous venons de dire, peut être considéré comme la réunion de deux tétraèdres croisés et ayant le même centre; par conséquent, cette molécule pourrait se prêter à un dédoublement, d'où résulterait la molécule hémiédrique dont nous venons de parler.

(1) M. Leymerie a eu, de son côté, la même idée que moi, et je m'applaudis fort de cette concordance de vues sur un point aussi important. (Voyez le Mémoire de cet auteur sur l'hémiédrie, cité plus haut, et aussi son *Cours de Minéralogie*, publié à Toulouse en 1857.)

Pour expliquer l'hémiédrie de la tourmaline, on peut aussi considérer sa molécule comme un rhomboèdre, qui serait une combinaison de deux pyramides à base équilatérale, en position inverse l'une à l'égard de l'autre, chaque pyramide ayant son sommet formé d'un atome d'une certaine espèce et sa base constituée de trois atomes d'espèce différente, et, de plus, les atomes de l'une des pyramides n'étant pas les mêmes que ceux de la seconde, comme l'indique la figure 53. Ce genre d'explication est tout aussi démonstratif, que celui auquel je donne maintenant la préférence, et qui consiste à prendre pour molécule la pyramide (fig. 51), provenant du dédoublement du rhomboèdre (fig. 53); j'avais d'ailleurs, dans mon Mémoire, indiqué le choix qu'on pouvait faire entre ces deux formes corrélatives. Cependant, quelques personnes ont cru voir des difficultés, qui n'existent réellement pas, dans une ou deux des explications que j'ai données en les appuyant sur l'hypothèse d'une molécule de forme holoédrique, où l'hémiédrie était accusée seulement par sa structure. On a mal compris surtout ce que j'ai dit touchant la pyrite, et je tiens à rectifier ici ce qu'il y a d'inexact dans les idées que me prête M. Dufrénoy, lorsqu'il rend compte dans son Traité de Minéralogie de ma théorie relative à l'hémiédrie.

Je disais, dans mon Mémoire, que la structure du cube de la pyrite est telle que tous ses angles solides, toutes ses arêtes et toutes ses faces sont parfaitement semblables, comme dans les cubes ordinaires, mais avec cette différence que tout n'est plus symétrique à droite et à gauche de la même arête, en sorte qu'il doit y avoir, entre les files de molécules qui, sur la même face, sont perpendiculaires entre elles et parallèles aux arêtes, une différence physique provenant de la forme de la molécule et de la manière dont elle est disposée dans chaque file. J'ajoutais qu'on pouvait se rendre compte de ces particularités de structure, en imaginant un polyèdre moléculaire, formé de six atomes allongés, ou, ce qui est la même chose, de six groupes linéaires d'atomes, avec les dispositions croisées que représentent les figures 54 et 55. Maintenant, on peut circonscrire cet assemblage d'atomes de deux manières différentes et également simples, par deux polyèdres, entre lesquels on choisira la forme représentative de la molécule. L'un de ces polyèdres est le dodécaèdre pentagonal (fig. 55) auquel on arrive, quand on construit la forme enveloppante, de manière que chaque plan touche à la fois trois atomes appartenant à deux couples rectangulaires:

c'est la forme représentative que j'adopte maintenant, et déjà depuis fort longtemps. L'autre est le cube, figures 54 et 55, qu'on obtient en menant des plans tangents à un seul couple d'atomes et perpendiculaires aux axes : c'est à cette seconde forme que je m'étais arrêté d'abord, dans le Mémoire dont il s'agit. Elle est bien un cube, comme on le voit, et non pas un prisme droit à base rectangle; je n'ai pas formé le cube de la pyrite par une juxta-position de molécules prismatiques rectangulaires (comme le dit M. Dufrénoy, pages 59 et 60 du 1er vol.), mais bien de molécules intégrantes cubiques, composées elles-mêmes d'atomes allongés ou disposés en séries linéaires. L'auteur reproduit encore, page 213, la même assertion, en disant que ma molécule de la pyrite est un prisme droit rectangulaire, tandis que, sous le rapport géométrique, elle n'est pas autre chose qu'un cube.

Ce qui paraît avoir induit le savant minéralogiste en erreur, c'est ce que j'ai dit des caractères physiques et cristallographiques de ce cube, en faisant remarquer que, sous le rapport de la symétrie, il était une forme intermédiaire entre le cube ordinaire et le prisme rectangle droit, et qu'on pouvait le considérer comme une limite qu'atteindrait ce dernier genre de forme, en supposant que l'inégalité de ses côtés diminue progressivement jusqu'à s'évanouir tout-à-fait, et qu'à cette limite le solide ait encore la même structure et la même symétrie qu'auparavant. Les axes de ce cube ayant la symétrie bilatérale, comme ceux du prisme droit rectangulaire, ses arêtes doivent se comporter comme le feraient celles d'un prisme rectangle droit. Ma molécule intégrante de la pyrite était donc cubique par sa forme, en même temps qu'elle présentait le caractère prismatique par sa structure (1). Au reste, toute équivoque disparaît, si l'on substitue au cube le dodécaèdre pentagonal; l'adoption de molécules de forme hémiédrique a d'ailleurs l'avantage de permettre une représentation très-nette et très-expressive de la structure au moyen de modèles en bois ou de dessins semblables à ceux des figures 19 et 20, pl. I.

(1) C'est ainsi que, s'il existe une substance rhomboédrique qui ait pour forme fondamentale un rhomboèdre aigu de 70° 32′, le rhomboèdre tangent aux arêtes culminantes de cette forme aura ses angles droits, et sera un cube, quant à la forme géométrique, un rhomboèdre, quant à la structure et à tous les rapports cristallographiques.

DES COMBINAISONS ET DE LA MANIÈRE DE LES DÉVELOPPER.

§ 1. *Considération des zones; son utilité. — Loi et méthode des zones.*

Les diverses formes simples que nous avons étudiées dans chaque système cristallin, et dont chacune est le produit d'une modification isolée sur un des groupes de parties identiques de la forme fondamentale, ne sont encore que les éléments du système, lesquels peuvent se combiner ensuite deux à deux, trois à trois, quatre à quatre, etc., pour composer des variétés de formes en nombre très-considérable, qu'on appelle des *combinaisons*. Ces combinaisons sont si nombreuses, qu'il faut renoncer à leur donner des noms particuliers, à moins qu'elles ne résultent de la réunion de deux ou trois formes simples, dont les noms puissent se composer facilement en un seul. C'est ainsi qu'on nomme *cubo-octaèdre*, la combinaison du cube et de l'octaèdre régulier; et *cubo-dodécaèdre,* celle du cube et du dodécaèdre rhomboïdal. On donne encore assez souvent le nom de *triforme* à la combinaison triple, formée du cube, de l'octaèdre régulier et du dodécaèdre. Mais, à l'exception de quelques cas de ce genre, les minéralogistes, quand ils ont à décrire une forme complexe, la décomposent toujours en ses diverses formes élémentaires, qu'ils énumèrent alors successivement, ou dont ils se bornent à donner les signes cristallographiques, en les écrivant à la suite les uns des autres.

Mais il existe une autre manière d'analyser une série cristalline, ou seulement une forme complexe, représentant une portion notable de cette série : c'est de la décomposer en plusieurs systèmes de faces, qui composent chacun ce que nous avons déjà nommé une *zone* (voyez p. 44). Une zone comprend toutes celles des faces d'un cristal qui forment autour de lui comme une ceinture prismatique, en se coupant successivement les unes les autres dans des intersections parallèles. On appelle *axe de la zone*, une droite passant par le centre du cristal et dirigée parallèlement aux intersections dont il s'agit: c'est, à proprement parler, l'axe du prisme dont ces intersections sont les arêtes longitudinales. La direction de l'axe détermine celle de la zone prismatique elle-même.

Dans la figure 1, pl. XII, qui représente une variété de quarz, composée de celles que Haüy a désignées par les noms de *rhombifère* et de *plagièdre*, on distingue plusieurs zones de directions différentes, l'une *verticale*, comme celle qui est composée des faces *r*, *r*, *r'*..., les autres *horizontales* (1), comme celles qui se composent des faces P, *r*, *z'*..., ou bien *z*, *r'*, P'... prises en tournant toujours dans le même sens autour du cristal; d'autres enfin *obliques*, comme celles qui se composent des faces *z*, *r*, *x'*, *s'*, P'..., ou bien *z*, *s*, *r*, P'..., et qui contournent le cristal en écharpe, de gauche à droite, ou de droite à gauche. Toutes les faces d'une zone ne se coupent pas toujours suivant des arêtes, comme on le voit pour deux des faces *r*, dans la figure précitée, lesquelles ne se touchent qu'en un seul point; deux faces d'une zone pourraient même se trouver séparées par une autre face, qui ne ferait point partie de cette zone; mais, dans tous les cas, les deux faces se couperaient comme les autres dans une arête parallèle à la direction commune, si on les prolongeait au-dessus des faces étrangères, qui sont interposées entre elles.

Le fait dont il est ici question, et qui consiste dans la rencontre successive de faces, qui se coupent toutes suivant des arêtes parallèles, est fort commun dans les cristaux; il n'avait pas échappé à Haüy, qui avait vu le parti qu'on peut en tirer, pour déterminer plus facilement les formes cristallines composées ou les combinaisons (2). Mais c'est à Weiss qu'on est redevable de l'importante considération des *zones*, dans laquelle se résument tous les faits de ce genre, et dont il a su déduire un principe ou une méthode de détermination des plus utiles pour la solution des problèmes cristallographiques, *la méthode de détermination par les zones*.

Le principe dont il s'agit consiste en ce que, si une face 5 (fig. 2, pl. XII) forme zone, d'une part et dans une certaine direction avec deux premières faces 1 et 2, d'autre part et dans une

(1) Les cristallographes allemands appellent horizontale, la zone dont les faces sont verticales, parce qu'ils la considèrent comme s'étendant horizontalement autour de la verticale; et, réciproquement, ils nomment verticale, celle dont les faces sont disposées en tournant autour d'un axe horizontal. Il nous a paru plus naturel de déterminer la direction d'une zone par celle de son axe, comme on fait pour les prismes en général, puisque les zones ne sont que des prismes indéfinis, à pans plus nombreux que ceux des prismes ordinaires.

(2) Voyez son *Traité de Cristallographie*, tome I, p. 470, où il montre comment, indépendamment de toute mesure d'angle, et par une méthode purement géométrique, on peut déterminer le signe d'une face inconnue, qui forme des arêtes parallèles par ses intersections avec des faces déjà connues.

autre direction avec deux nouvelles faces 3 et 4 ; en d'autres termes, si la face intermédiaire 5 est la troncature ou section *parallélogrammique* (1) de l'angle solide que produirait la rencontre des faces 1, 2, 3 et 4, la face 5 est parfaitement déterminée en direction, et l'on peut avoir son signe par un moyen purement géométrique et sans recourir à aucune mesure d'angle, si l'on connaît d'avance ceux des faces qui la comprennent entre elles. Il est facile de voir, en effet, que la première condition, de faire zone avec les faces 1 et 2, revient à dire que la face à déterminer est parallèle à la droite d'intersection de ces faces, et que par la seconde condition cette face doit être aussi parallèle à l'intersection des faces 3 et 4 : or, un plan est déterminé en direction, quand il est assujetti à la double condition d'être parallèle à deux droites connues. Il doit donc exister une certaine relation simple, à laquelle on peut donner le nom d'*équation de zone*, entre les coëfficients paramétriques des faces 1, 2 et 5, comme aussi entre ceux des faces 3, 4 et 5 ; et ces deux équations, combinées l'une avec l'autre, donneront les valeurs des paramètres de la cinquième face, en fonction de ceux des quatre premières faces.

Cette corrélation remarquable entre les faces cristallines, qui permet au cristallographe de déduire une face inconnue de quatre autres faces déjà connues, est ce que Weiss a appelé la *loi des zones*. C'est une seconde manière de se représenter la dépendance mutuelle qui existe entre les différents plans d'un même système, et qui a été déjà exprimée par la loi des troncatures rationnelles. Ces deux lois sont parfaitement l'équivalent l'une de l'autre ; elles sont toutes deux des conséquences naturelles de la structure en réseau, qui caractérise essentiellement la cristallisation ; et c'est à tort que MM. Weiss et Neumann ont voulu attribuer une sorte de primauté à la loi des zones, et la considérer comme l'unique fondement de celle des troncatures rationnelles : elles peuvent, au même titre, être envisagées comme lois primordiales, n'étant que deux expressions différentes d'un même fait primitif, savoir la disposition réticulaire et parallélogrammique des molécules cristallines. Mais la loi des zones a une importance et une utilité particulières dans la pratique, que Weiss a montrées le premier, et qui ont été surtout mises en lumière

(1) On démontre, en géométrie, qu'une pyramide quadrangulaire ne peut être coupée que d'une seule manière par un plan, sous la condition que la section soit un parallélogramme.

par les travaux de deux savants de son école, MM. Neumann et Quenstedt.

Pour exprimer de la manière la plus simple la loi des zones, c'est-à-dire la condition nécessaire pour qu'une face soit comprise dans la zone déterminée par deux autres faces, il faut partir du signe général proposé par Neumann, $\left(\frac{1}{m}a : \frac{1}{n}b : \frac{1}{p}c\right)$, par lequel on peut représenter toute face cristalline, en y supposant m, n, p entiers; puis, sans lui rien ôter de sa généralité, le ramener à la forme plus simple $\left(\frac{1}{\mu}a : \frac{1}{\nu}b : c\right)$, en multipliant dans le premier signe tous les termes par p, et faisant, pour abréger, $\frac{m}{p}=\mu, \frac{n}{p}=\nu$, μ et ν pouvant être des fractions rationnelles aussi bien que des nombres entiers. Et alors, si $\frac{1}{\mu'}, \frac{1}{\nu'}$ désignent les caractéristiques connues d'une première face, $\frac{1}{\mu''}, \frac{1}{\nu''}$ celles d'une seconde face pareillement donnée, et $\frac{1}{\mu}, \frac{1}{\nu}$ les caractéristiques cherchées d'une troisième face, comprise dans la zone des deux premières, on aura, pour équation de zone, la relation (1):

$$\frac{\mu-\mu'}{\mu-\mu''}=\frac{\nu-\nu'}{\nu-\nu''} \quad (A),$$

ou la suivante, en restituant les indices ordinaires m, n, p, et faisant disparaître les dénominateurs:

$$\left(\frac{m}{p}-\frac{m'}{p'}\right)\left(\frac{n}{p}-\frac{n''}{p''}\right)=\left(\frac{m}{p}-\frac{m''}{p''}\right)\left(\frac{n}{p}-\frac{n'}{p'}\right) (B).$$

Si la face $\left(\frac{1}{\mu'}, \frac{1}{\nu'}\right)$ est aussi comprise dans la zone de deux autres faces connues $\left(\frac{1}{\mu'''}, \frac{1}{\nu'''}\right)$, et $\left(\frac{1}{\mu^{iv}}, \frac{1}{\nu^{iv}}\right)$, on aura une seconde équation de même forme que (A):

$$\frac{\mu-\mu'''}{\mu-\mu^{iv}}=\frac{\nu-\nu'''}{\nu-\nu^{iv}} \quad (C);$$

et la résolution des deux équations (A) et (C) fournira les va-

(1) Voyez, pour la démonstration de cette formule, l'appendice qui termine ce volume.

leurs de μ et de ν, en fonction de celles de μ', ν'; μ'', ν''; μ''', ν'''; et μ^{iv}, ν^{iv}.

Pour n'avoir point à résoudre ces équations dans chaque cas particulier, on pourra se servir des formules suivantes, données par Neumann (1), et qui se rapportent au signe général $\left(\frac{1}{m}a : \frac{1}{n}b : \frac{1}{p}c\right)$:

$$\begin{aligned} m &= PN' - P'N \\ n &= MP' - M'P \quad (D), \\ p &= MN' - M'N \end{aligned}$$

en admettant que l'on pose

$$\left.\begin{aligned} M &= n'p'' - n''p' \\ N &= p'm'' - p''m' \\ P &= m'n'' - m''n' \end{aligned}\right\}, \text{ et } \left.\begin{aligned} M' &= n'''p^{iv} - n^{iv}p''' \\ N' &= p'''m_{iv} - p^{iv}m''' \\ P' &= m'''n^{iv} - m^{iv}n''' \end{aligned}\right\}.$$

Comme application de cette méthode de détermination des faces, supposons que dans la variété du quarz, représentée fig. 1, on rapporte les faces à trois des axes de la pyramide di-hexagonale, savoir l'axe vertical c de cette pyramide, et les deux axes secondaires a, a, que coupe la face P; on aura immédiatement les signes des quatre faces P, z, r' et r, entre lesquelles est comprise la face rhombe s; le signe de P est évidemment $(a : a : c)$, duquel on tire $m' = 1, n' = 1, p' = 1$; celui de r' est $(\infty a : a : \infty c)$, d'où l'on conclura $m'' = 0, n'' = 1$, et $p'' = 0$; celui de z est $(\infty a : a : c)$, d'où $m''' = 0, n''' = 1, p''' = 1$; et enfin, celui de r est $(a : a : \infty c)$, où $m^{iv} = 1, n^{iv} = 1, p^{iv} = 0$. La facette s, d'après sa forme parallélogrammique, étant comprise dans la zone des faces P, r', et dans celle des faces z, r, est déterminable par la méthode des zones; les formules (D) donnent en effet pour les indices de cette face $m = 1, n = 2, p = 1$, ce qui veut dire que la face s coupe les trois axes à des distances 1, $\frac{1}{2}$ et 1, comme Haüy l'avait reconnu, d'après le parallélisme des bords de cette petite facette avec deux des arêtes de la pyramide.

Il importe d'avoir un moyen de s'assurer si trois ou un plus grand nombre de faces d'un cristal font partie d'une même zone, ou sont *tautozonaires*. Si ces faces se coupent successivement dans des arêtes parallèles, sans être séparées par des facettes

(2) Voyez ses *Beytræge zur Krystallonomie*, p. 3; Berlin, 1823; et sa Thèse inaugurale, publiée en 1826, sous le titre : *De Lege zonarum, principio evolutionis Systematum cristallinorum.*

étrangères, on pourra s'en rapporter au témoignage des sens : car l'œil est bon juge du parallélisme de lignes très-rapprochées; mais, s'il y a des faces qui s'interposent entre les termes de la série zonaire, de manière à ne pas permettre leur intersection immédiate, on aura recours dans ce cas au goniomètre à réflexion, pour savoir si une ou plusieurs facettes font réellement partie de la zone déterminée par deux premières faces. On disposera le cristal sur le support de l'instrument, et on orientera celui-ci par rapport aux mires, comme pour mesurer l'angle dièdre de ces faces, et si les autres facettes reproduisent pour l'œil la même coïncidence d'images qu'on aura obtenue avec les deux premières, ce sera la preuve qu'elles font toutes partie d'une même zone.

Un des grands avantages de la considération des zones dans l'étude des formes cristallines, c'est qu'elle facilite le développement des combinaisons, ou l'évolution successive des différents membres dont se compose le système. Elle permet la détermination des faces inconnues par le moyen des faces déjà connues, et cela sans qu'on ait besoin de recourir à des tâtonnements, et de s'appuyer sur des mesures goniométriques. Dans ce développement progressif, chaque nouvelle face est déterminée par les zones des faces antérieurement calculées; et il suffit de connaître quatre premières faces non parallèles, pour pouvoir en déduire successivement toutes les autres : car, d'après la loi des zones, ces quatre premières faces en déterminent une cinquième, qui, combinée ensuite avec trois des faces déjà connues, en donnera une sixième, et ainsi de suite, en combinant toujours les faces nouvelles avec les anciennes.

Il est une propriété commune à un grand nombre de zones, et qui a aussi son utilité dans la détermination des formes cristallines : c'est celle à laquelle on a donné le nom de *tautométrie*, parce qu'elle permet de calculer directement les unes par les autres les inclinaisons des faces tautozonaires, des faces qui appartiennent à une même zone, lorsque, d'après la nature du système, des axes cristallographiques rectangulaires sont possibles dans le plan normal à l'axe de cette zone. On a reconnu que, dans ce cas, si l'on représente les inclinaisons mutuelles des faces par leurs tangentes trigonométriques, ces tangentes ont toujours des valeurs numériques, qui sont entre elles dans des rapports simples et rationnels; c'est-à-dire que la loi des multiples, et le moyen de calcul qui en est la conséquence, s'étendent

dans ce cas jusqu'aux angles eux-mêmes, du moins quand on les exprime par les tangentes (1).

L'indication des zones de faces, observées dans la série cristalline d'un minéral, sert encore à faire connaître le degré et le mode de développement de cette série naturelle, et à établir des distinctions entre elle et d'autres séries du même genre. On remarque en effet que, dans les espèces qui se rapportent au même système cristallin, et qui pourraient par conséquent offrir le même ensemble de formes, il y a souvent une prédominance marquée de certaines zones de faces, qui paraissent avoir plus de facilité à se produire que celles qui appartiennent à d'autres zones. C'est ainsi que, dans le quarz-hyalin, les zones obliques ont plus de tendance à se développer que les zones horizontales, et celles-ci plus que la zone verticale; et il y a déjà longtemps que Weiss a signalé cette marche particulière que suit dans le développement de ces zones diverses, la série cristalline du quarz (2). C'est ce genre d'observation qui a conduit les cristallographes à ne plus se contenter de figurer isolément les variétés de formes cristallines qu'un minéral présente, mais à les fondre, pour ainsi dire, dans une représentation générale et commune, de manière qu'on puisse saisir d'un seul coup d'œil la marche et le degré de développement des zones, qui caractérisent le mieux la cristallisation de ce minéral. C'est ce qui a été fait par W. Phillips, dans son Traité élémentaire de Minéralogie, qui offre un grand nombre d'exemples de ces figures d'ensemble : mais, sous ce rapport, on doit une attention toute particulière aux méthodes graphiques, si simples et en même temps si avantageuses, qu'a imaginées Neumann, et qui constituent comme une sorte de géométrie descriptive à l'usage des minéralogistes.

§ 2. *Méthodes graphiques. — Leur application à la doctrine des zones.*

On doit à M. Neumann de Königsberg l'idée première des diverses méthodes que l'on suit dans la représentation graphique

(1) Voyez sur ce point l'Appendice final, et consultez les auteurs suivants : Hausmann (*Handbuch der Mineralogie*, 1er vol., p. 84; 1828) et Kupffer (*Handbuch der rechnenden Krystallographie*, p. 182; 1831).

(2) Voyez le Mémoire qui a pour titre : *Ueber der eigenthümlichen Gang des Krystallsystems beim Quartz*, dans le *Magazin der Gesellschaft der Naturfreunde*, 7e année, 3e cahier.

des zones, ou, plus généralement, d'un ensemble quelconque de faces appartenant à une même série (1). Aux figures ordinaires en perspective, il a substitué des projections, soit sur la surface d'une sphère, soit sur un plan, dans lesquelles chaque face est représentée par un point ou par une droite, et qui laissent voir au premier coup d'œil quelles sont les faces qui appartiennent à une même zone, et dans combien de zones différentes tombe la même face.

1° *Projection sur la sphère.* — Dans cette méthode particulière de projection, on suppose une sphère, décrite d'un rayon quelconque autour du centre du cristal, et la position de chaque face est indiquée par le point où le rayon normal à cette face rencontre la surface de la sphère de projection. Ce point d'intersection s'appelle le *pôle* de la face. L'arc de grand cercle, qui se termine à deux pôles donnés, est la mesure de l'angle que forment entre elles les faces correspondantes. La trigonométrie sphérique est le moyen de calcul qui s'offre naturellement à l'esprit, lorsqu'on fait usage de cette méthode de projection. Toutes les faces qui appartiennent à une même zone, ont leurs pôles situés sur un même grand cercle, qu'on nomme *cercle de zone;* et le diamètre qui réunit les deux pôles de ce grand cercle, est l'*axe de la zone.* Toute face qui fait partie à la fois de deux ou d'un plus grand nombre de zones, a son pôle situé à l'intersection commune des cercles de ces zones. Cette méthode, proposée d'abord par Neumann et appliquée par lui-même, a été suivie par M. Miller dans son Traité de Cristallographie, comme on peut le voir dans la traduction française qu'en a donnée M. de Sénarmont.

2° *Projections sur le plan.* — A. Première méthode, dite *par points.* Dans cette méthode, on prend pour tableau ou plan de projection, un plan parallèle à l'une des sections principales de la forme fondamentale. Par le centre des axes, on mène des normales aux diverses faces, et on les prolonge jusqu'à la rencontre du plan de projection : le point d'intersection de ce plan et d'une de ces normales est le *lieu* de la face qui lui correspond. Il est facile de voir que tous les lieux des faces qui appartiennent à une même zone, sont en ligne droite; et autant il y aura, dans la projection totale, de lignes droites passant par trois ou un plus grand nombre de ces points d'intersection, autant la série

(1) Voyez l'ouvrage déjà cité, et qui a pour titre : *Beytrage zur Krystallonomie.*

cristalline, ainsi figurée, comprendra de zones différentes. Un simple coup d'œil, ou mieux, si la figure a été faite avec soin, l'application de la règle fera reconnaître ceux des points d'intersection qui seront situés dans une même direction. Toutefois, la rencontre de plusieurs points en ligne droite est moins facile à constater que le croisement de plusieurs droites en un même point. Aussi, à la méthode par points, dont nous venons de parler, préfère-t-on généralement la méthode par lignes, dont il va maintenant être question.

B. Seconde méthode, dite *linéaire*, ou par lignes droites. Cette méthode a été également proposée par Neumann, mais appliquée pour la première fois, et développée par Quenstedt (1). Elle est aujourd'hui généralement suivie en Allemagne (Naumann ; Rammelsberg, etc.). Dans cette méthode, on considère les faces elles-mêmes, et non leurs normales, et l'on s'appuie sur ces deux propositions : 1° que si toutes les faces d'une série cristalline sont transportées parallèlement à elles-mêmes, jusqu'à ce qu'elles passent par un seul et même point de l'axe vertical, chacune d'elles sera distinguée des autres et déterminée par sa ligne de section ou par sa *trace* sur le plan formé par les autres axes; 2° que toutes celles qui appartiendront à une même zone, se couperont alors en une seule et même droite, qui sera l'*axe* ou la ligne de zone. Le point où l'axe d'une zone rencontre le plan de construction, est ce que l'on nomme un *point de zone;* et dans ce point se croisent, en rayonnant en tous sens, les diverses lignes de section qui représentent les faces de la zone, et que Quenstedt appelle *lignes de faces*. Réciproquement, dans toute projection de ce genre, chaque point de croisement de plusieurs droites correspond à une zone; et une face du système tombe en autant de zones différentes qu'il y a de pareils points dans sa trace sur le tableau.

Dans l'application de ce procédé, on transporte toutes les faces parallèlement à elles-mêmes, jusqu'à ce qu'elles passent par un point de l'axe vertical c, situé à l'unité de distance de l'origine des axes : ce qui revient à transformer le signe général de chaque face $\left(\frac{1}{m}a:\frac{1}{n}b:\frac{1}{p}c\right)$, dans lequel m, n, p sont des nombres entiers, en un signe de la forme $\left(\frac{1}{\mu}a:\frac{1}{\nu}b:c\right)$, où

(1) Voir Quenstedt : *Methode der Krystallographie*; Tubingue, 1840; et *Handbuch der Mineralogie*, 1854.

il n'y a plus que deux indices qui puissent varier, et où μ et ν peuvent être des fractions rationnelles (*voyez* ci-dessus p. 179). Les deux coëfficients $\frac{1}{\mu}, \frac{1}{\nu}$ détermineront chaque ligne de face, en faisant connaître ses paramètres particuliers, exprimés par les multiples ou les sous-multiples des paramètres fondamentaux a, b.

Si toutes les faces de la série à figurer sont données par leurs signes, préalablement ramenés à la forme $\left(\frac{1}{\mu} a : \frac{1}{\nu} b : c\right)$, il sera facile de construire la figure générale qui représentera sur le plan, de la manière la plus immédiate, l'ensemble des faces, et rendra sensibles aux yeux toutes les relations des zones qu'elles forment entre elles. Pour cela on tracera sur le tableau deux droites se coupant en un point sous l'angle même des deux axes a et b de la forme fondamentale; on divisera le premier, à partir du point de croisement, en parties égales entre elles et au paramètre a; et pareillement le second, en parties égales à b; et prenant ensuite, pour chaque face, des multiples de a et de b, égaux à $\frac{1}{\mu} a$, $\frac{1}{\nu} b$, et les portant sur les axes correspondants, à droite ou à gauche du centre, selon que les quantités $\frac{1}{\mu}, \frac{1}{\nu}$ seront positives ou négatives, on construira successivement toutes les lignes de face, et l'on obtiendra ainsi une figure générale, qui rappellera par sa forme la symétrie propre à la série cristalline représentée. Dans le système hexagonal, au lieu de tracer sur le tableau deux seulement des axes secondaires, on représente les trois axes se coupant sous des angles de 60°, et la figure totale est alors parfaitement symétrique à l'égard de ce système d'axes. Supposons, par exemple, que l'on veuille projeter sur un plan la variété rhombifère de quarz représentée par la figure 1, moins les facettes x, x', et dont la notation cristallographique, conformément à ce qu'on a vu p. 180, est la suivante :

$$P = (a : a : c),$$
$$z = (\infty a : a : c),$$
$$r' = (\infty a : a \infty c)$$
$$r = (a : a : \infty c),$$

on tracera sur le plan du tableau, autour d'un centre o, trois droites faisant entre elles des angles de 60°, et on les divisera

en parties égales à a; et on aura évidemment la trace de la face P, en prenant sur les deux axes, dirigés en avant, des segments égaux à a; cette trace sera donc la ligne PP. Celle de r lui sera parallèle, et de plus, elle devra passer par le centre o, puisque r est verticale et passe par un point de l'axe c : la ligne rr sera donc cette trace. La droite $r'r'$ représentera de même la face r', et la droite zz la face z. Reste maintenant la face s. Si son signe est donné d'avance, comme ceux des faces dont nous venons de parler, on construira sa ligne de section sans aucune difficulté. Mais, pour donner un exemple de la manière de déduire une face inconnue de plusieurs faces connues, par la méthode graphique des zones, nous supposerons que l'on ignore le signe de la face s, et qu'on sache seulement, d'après l'examen du cristal, que cette face est comprise à la fois dans la zone des faces P, r', et dans celle des faces z, r. Dès-lors, sa trace est déterminée, sur le tableau de projection, par la double condition de passer par le point de zone des faces P, r', et par celui des faces z et r. Cette trace sera donc la ligne ss, menée par les points d'intersection m et n. Maintenant la figure donne de plus les paramètres de la face s : car on sait déjà qu'elle passe, à la distance c de l'origine, sur l'axe vertical, et la figure nous apprend en outre qu'elle coupe l'un des axes a à une distance égale à l'unité paramétrique, et l'axe suivant à une demi-distance $\frac{1}{2}a$. Le signe de s sera donc $(a:\frac{1}{2}a:c)$, comme nous l'avions déjà trouvé par le calcul.

CHAPITRE V.

DU GROUPEMENT RÉGULIER DES CRISTAUX.

Les cristaux se montrent rarement dans la nature à l'état d'isolement; ils s'aggrègent fréquemment entre eux de différentes manières et composent ainsi des groupes dont la configuration extérieure est plus ou moins régulière. Parmi ces groupes, il en est qui sont soumis à des lois cristallographiques ou géométriques, et par conséquent déterminés par la forme même des individus réunis : ce sont ceux qui sont plus particulièrement désignés par les noms de *macles* et d'*hémitropies*. Il est d'autant plus

nt de les bien connaître, que quelques-uns présentent nce de cristaux simples, et pourraient être pris pour tels, s inconvénient, si l'on n'y regardait pas de très-près. Il ıc avoir des moyens sûrs pour discerner les cas où les sont réellement simples, et ceux où il y a *groupement*, ire aggrégation de plusieurs individus. Nous ne parle- ce moment que des groupements qui se font avec régu- uivant une loi qui se retrouve la même dans un grand d'associations, auxquelles elle imprime ainsi des carac- variables.

roupements réguliers n'ont lieu le plus ordinairement e des cristaux de même espèce, de même structure et de orme; cependant, il est quelques exceptions à cette règle, us obligeront à partager les groupements réguliers en tégories: 1° les groupements d'individus de même nature, ie et de structure moléculaire parfaitement semblables: les plus communs, et ceux dont l'étude offre le plus d'in- ° ceux d'individus de même nature, mais de forme et de e *inversement* semblables: ils sont très-rares, et ne se rent que parmi les espèces à formes hémiédriques, et tétartoédriques; 3° ceux d'individus appartenant à des différentes, mais qui cependant se rapprochent à un degré par leur forme et par leur composition. Commen- ır étudier le premier cas, qui donne lieu à une multitude sidérations très-importantes.

PREMIÈRE DIVISION.

upements réguliers d'individus de même espèce, de forme et de structure absolument semblables.

groupements, qui sont très-nombreux, se prêtent à plu- ubdivisions, que nous allons indiquer, afin de mettre de dans cette étude assez compliquée. On peut d'abord les dans deux séries, selon que le groupement est réglé par cristallographique, ou qu'il paraît avoir été déterminé par ation purement géométrique, à laquelle ne répond aucune ordinaires de dérivation des formes cristallines.

A. *Groupements déterminés par une loi cristallographique. — Plans de jonction des individus généralement parallèles à des faces cristallines, de signe très-simple et ayant tout-à-fait le caractère des faces limites ordinaires.*

Le groupement régulier des cristaux s'opère en général lorsque ceux-ci commencent à se former, ou qu'ils sont encore à l'état rudimentaire. A ce moment, ils semblent concerter leurs positions relatives, et ils se joignent, soit par des faces égales, soit par des arêtes ou des angles solides égaux. Une fois qu'ils sont soudés l'un à l'autre, ils s'accroissent en commun, par une succession de couches enveloppantes, comme s'ils ne faisaient qu'un seul et même cristal. De là résultent deux conséquences remarquables : l'une, c'est que les cristaux doivent se déformer de plus en plus, par l'effet même de cet accroissement simultané, de manière à ne plus ressembler bientôt qu'à des cristaux tronqués ou fractionnaires, à des quarts ou des moitiés de cristaux réunis ; l'autre, c'est que, dans tous les cas, ils doivent nous paraître s'être joints par des plans, quand bien même ils se seraient accolés primitivement par des arêtes ou par de simples points. Car, c'est encore un effet de l'accroissement en commun, que d'élargir la jointure ou partie commune de deux cristaux, et de transformer rapidement en véritables plans les arêtes ou les points par lesquels elle a pu commencer. C'est ce que la figure 4, pl. XII, fera comprendre à la première vue. Elle représente deux petits cristaux *a* et *b*, deux rhomboèdres par exemple, qui se sont groupés par leurs sommets, et par conséquent ont été momentanément réunis par un seul point, ou par une seule de leurs molécules extrêmes. Mais chacune des couches enveloppantes, en ajoutant à la solidité du groupe, a élargi en même temps la jonction, qui s'est étendue de plus en plus sous la forme d'un plan *mn* ; il doit donc toujours exister un pareil plan à la séparation commune de deux cristaux juxta-posés : c'est ce que l'on appelle un *plan de jonction* ou *face de groupement*. Il peut y en avoir plus d'un, si les cristaux engrènent ou s'entrecroisent, comme nous le verrons par la suite.

La figure précédente nous montre, en outre, que les cristaux pris individuellement ne perdent rien de leur accroissement dans le sens *mn*, parallèle au plan de jonction ; mais il n'en est pas de même dans le sens perpendiculaire : l'accroissement n'a plus lieu

que d'un seul côté, le plan de jonction faisant obstacle à l'arrivée des molécules du côté opposé, et c'est ce qui fait que les cristaux ne sont plus au complet, et que leur assemblage représente plutôt deux fragments de cristaux réunis, et, pour ainsi dire, deux moitiés d'un même cristal que l'on aurait séparées, puis rapprochées de nouveau, ou que l'on aurait fait tourner l'une sur l'autre, pour les fixer ensuite dans une autre position. Il résulte de cette remarque, que ce qu'il y a de mieux à faire pour arriver à une représentation exacte des *doubles-cristaux* ou groupes de deux cristaux, que l'on observe si fréquemment dans la nature, et dans lesquels les individus sont l'un à l'égard de l'autre dans une position inverse, c'est de suivre l'exemple que Haüy nous a donné : son procédé consistait à prendre un modèle d'un cristal simple, à le couper en deux par un plan passant par le centre, puis à faire tourner l'une des moitiés sur la seconde, pour l'amener dans une autre position relative. De là le nom d'*hémitrope*, qu'il donnait au modèle d'un cristal qui avait subi un retournement de ce genre dans une de ses moitiés, et qu'il étendait ensuite aux doubles-cristaux naturels. Nous emploierons souvent ce moyen, dans l'examen rapide que nous allons faire des principaux genres de groupements réguliers ; mais il ne faut pas perdre de vue que les choses ne se passent pas ainsi dans la nature, et que toute hémitropie résulte du groupement par juxtaposition, non de deux moitiés d'un même cristal, mais bien de deux cristaux distincts, qui se sont soudés dès l'origine, et ont crû simultanément dans la position même où ils sont placés actuellement.

Nous considérerons d'abord et d'une manière toute particulière les groupements de deux cristaux seulement, ce que les minéralogistes allemands appellent *Zwillingskrystalle* (cristaux jumeaux ou doubles-cristaux), parce que la loi de ces groupements étant connue, il est aisé de l'étendre aux groupes plus complexes, qui le plus souvent ne font qu'offrir la répétition de la même loi d'un cristal à un autre.

La première circonstance remarquable, c'est celle qui concerne la nature et la position du plan de jonction, ou de la face commune à deux cristaux régulièrement unis, et qui partage le groupe en deux moitiés symétriques. Ce plan, qu'on peut appeler l'*équateur* du cristal double, correspond généralement (1)

(1) Le plan de jonction [illegible] ou plan d'hémitropie est presque toujours parallèle à une face, et même, [illegible] Haüy, [illegible] à la plus grande [illegible]

l de deux conditions, la rationnalité d'abord et
:ité des nombres par lesquels on doit multiplier
s arêtes de la forme fondamentale, pour avoir
'es des segments d'arête détachés de cette forme
:ature : les mêmes conditions se retrouvent, lors-
aler la loi qui règle les plans de jonction des
.

iir ce qu'il y a de remarquable dans cette loi,
senter que deux cristaux semblables peuvent
et mis en contact l'un avec l'autre de bien des
ntes ; et que, même en excluant toutes les posi-
our lesquelles le plan de jonction, résultant du
nédiat ou de l'accroissement postérieur, ne cor-
icune loi rationnelle de dérivation, il y aurait
bre prodigieux de combinaisons qui seraient
iquement réalisables. Eh bien ! ici comme dans
es facettes modifiantes ordinaires, la nature
ıne sorte de prédilection pour les résultats les
s'arrête presque toujours à celles de ces combi-
primient cristallographiquement de la manière
quée.

guer deux classes de groupements, parmi ceux
ographiquement déterminables. Dans la pre-
ux groupés sont en position directe ou parallèle,
les axes, les lignes et les faces homologues de
parallèles respectivement (*groupements directs*,
la seconde, les cristaux sont groupés dans des
s les unes relativement aux autres, en sorte
le parallélisme entre leurs axes, ni entre leurs
es (*groupements inverses*, Beudant). Examinons
es deux classes de groupements.

ts de cristaux sans inversion, ou *avec parallélisme*
s individus (*groupements directs*).

sente assez fréquemment dans la nature, et
rêmement simple à concevoir, il ne nous arrê-
s instants. Il arrive le plus souvent qu'un très-
le petits cristaux de la même forme se groupent
s uns aux autres, en s'accolant par des parties
n se combinant de manière à produire un tout

selon Haüy et Weiss, à une face cristalline, existante ou non sur les individus considérés isolément, mais qui, dans tous les cas y est possible, et peut y être produite par une des modifications les plus simples et les plus ordinaires. Ainsi, le plan de jonction est facile à déterminer cristallographiquement, puisqu'il est une des faces du système cristallin, et, par conséquent, sa position est fixée par le signe qui représente cette face. Celle-ci est le plus souvent perpendiculaire à un axe ou à une arête du cristal, ou bien elle est parallèle à sa base, à l'une de ses sections diagonales, ou à l'un de ses clivages principaux. Telle est donc la première loi et la loi générale des groupements compris dans la première catégorie: le plan de jonction est parallèle, non-seulement à l'un des plans du système cristallin, mais encore à l'un de ceux qui sont exprimés par les signes les plus simples, même dans le cas où ce plan ne se trouverait pas sur les cristaux simples, et serait par conséquent le résultat du groupement et de l'accroissement qui a eu lieu postérieurement.

On se rappelle que la position des facettes ordinaires de mo-

ralogistes, il le serait toujours. Cependant, dans quelques cas rares, il semble ne répondre à aucun des plans du système et satisfaire alors à une autre condition cristallographique, celle d'être *perpendiculaire à une arête*. C'est ce qui a conduit Mohs à admettre deux formules différentes pour la détermination des plans de jonction, et par suite deux lois cristallographiques pour l'explication des groupements réguliers. Suivant ce minéralogiste, la condition qui rend ces groupements déterminables consiste dans la communauté, soit d'une face (c'est le cas le plus ordinaire), soit d'une arête, entre les deux individus réunis. Nous ferons bientôt connaître le petit nombre des groupements que l'on a cherché à expliquer par cette seconde loi de Mohs, savoir : la communauté d'une arête entre les deux cristaux, et par suite la perpendicularité à cette arête de leur plan de jonction. Parmi ces groupements, il en est où le plan de jonction, supposé perpendiculaire à l'arête, et qui, dans cette supposition, n'appartiendrait pas au système, approche tellement de se confondre avec une face cristalline donnée par une loi simple, que plusieurs cristallographes ne regardent la perpendicularité que comme apparente, et n'admettent pour ces cas que la loi ordinaire. Quant aux autres exemples, dans lesquels on ne peut se refuser à reconnaître l'existence d'un plan de jonction normal à une arête, et qui ne pourrait être rapporté à une face que d'une manière forcée, ils ne se rencontrent que parmi les groupements par pénétration et entrecroisement, où il y a toujours deux plans de jonction différents, déterminés par l'accroissement de chacun des deux individus, en sens opposés, de part et d'autre de leur point d'origine. De ces deux plans, qui sont perpendiculaires l'un à l'autre, l'un est parallèle à une face et l'autre normal à une arête. Les deux lois étant toujours ainsi complémentaires l'une de l'autre, et la seconde n'étant en quelque sorte que la conséquence de la première, il s'ensuit qu'on pourrait se borner à n'en considérer qu'une, comme l'ont fait Haüy et plusieurs autres cristallographes, qui n'indiquent jamais, dans leurs descriptions des groupements, que les plans de jonction parallèles à des faces.

ification dépend de deux conditions, la rationnalité d'abord et nsuite la simplicité des nombres par lesquels on doit multiplier espectivement les arêtes de la forme fondamentale, pour avoir s valeurs relatives des segments d'arête détachés de cette forme ar chaque troncature : les mêmes conditions se retrouvent, lorsu'on veut formuler la loi qui règle les plans de jonction des oubles-cristaux.

Pour bien saisir ce qu'il y a de remarquable dans cette loi, l faut se représenter que deux cristaux semblables peuvent tre rapprochés et mis en contact l'un avec l'autre de bien des ianières différentes ; et que, même en excluant toutes les positions relatives pour lesquelles le plan de jonction, résultant du roupement immédiat ou de l'accroissement postérieur, ne correspondrait à aucune loi rationnelle de dérivation, il y aurait ncore un nombre prodigieux de combinaisons qui seraient ossibles et physiquement réalisables. Eh bien ! ici comme dans a production des facettes modifiantes ordinaires, la nature emble obéir à une sorte de prédilection pour les résultats les lus simples, et s'arrête presque toujours à celles de ces combinaisons qui s'expriment cristallographiquement de la manière a moins compliquée.

On peut distinguer deux classes de groupements, parmi ceux ui sont cristallographiquement déterminables. Dans la preiière, les cristaux groupés sont en position directe ou parallèle, 'est-à-dire que les axes, les lignes et les faces homologues de es cristaux sont parallèles respectivement (*groupements directs*, eudant); dans la seconde, les cristaux sont groupés dans des ositions inverses les unes relativement aux autres, en sorte u'il n'y a plus de parallélisme entre leurs axes, ni entre leurs aces homologues (*groupements inverses*, Beudant). Examinons uccessivement ces deux classes de groupements.

§ 1. *Groupements de cristaux sans inversion*, ou *avec parallélisme des individus* (*groupements directs*).

Ce cas se présente assez fréquemment dans la nature, et omme il est extrêmement simple à concevoir, il ne nous arrêera que quelques instants. Il arrive le plus souvent qu'un trèsrand nombre de petits cristaux de la même forme se groupent arallèlement les uns aux autres, en s'accolant par des parties emblables, et en se combinant de manière à produire un tout

régulier et de forme déterminable. La configuration résultante est tantôt une forme cristalline appartenant au système du minéral, tantôt une simple forme imitative (arborisation, réseau, tricot, etc.), mais qui offre toujours un certain rapport avec la symétrie propre à ce système.

Dans le cas où la configuration représente un cristal simple, la forme de ce cristal peut être la même que celle des cristaux élémentaires dont il est formé. C'est ainsi que des cristaux de quarz, de la forme du prisme pyramidé, se groupent fréquemment les uns sur les autres, soit par les sommets, soit par les faces prismatiques; et lorsque les cristaux composants ont sensiblement le même volume, ils tendent à reproduire par leur ensemble la même forme, c'est-à-dire un prisme pyramidé, dont les surfaces terminales se composent d'une multitude de petits rectangles ou de petits triangles, placés de niveau. On observe aussi souvent, dans la fluorine et dans la galène, de petits cristaux cubiques, dont la réunion produit un autre cube plus volumineux; dans le calcaire spathique, on rencontre des scalénoèdres qui sont le résultat du groupement d'une multitude de petits scalénoèdres de la même forme. Ce cas est beaucoup plus fréquent qu'on ne l'imagine; et l'on peut même dire que presque tous les gros cristaux, et généralement aussi les cristaux déformés, sont des masses complexes, ou, suivant l'expression de Naumann, des cristaux polysynthétiques, produits par la réunion d'une foule de petits cristaux semblables.

Ce genre de groupement donne aussi naissance à des formes différentes de celle des cristaux élémentaires, mais qui appartiennent toujours au même système cristallin. Ainsi, dans la fluorine de Schlaggenwald, on voit souvent des réunions de cristaux cubiques sous la forme de l'octaèdre régulier, comme celle qui est représentée figure 30, pl. XV, ou sous celle du rhombo-dodécaèdre, comme figure 23; on rencontre dans le calcaire spathique des groupements de rhomboèdres d'une certaine variété, représentant des rhomboèdres d'une autre variété ou des scalénoèdres; et l'on peut observer des groupements analogues dans tous les systèmes. Ce fait bien constant est la confirmation de cette vue théorique du cristallographe français, d'après laquelle toutes les formes cristallines d'un même système peuvent être construites géométriquement avec des éléments moléculaires, semblables à une quelconque des formes du système (voyez l'article qui concerne la théorie des décroissements).

2. *Groupements avec inversion* ou *sans parallélisme des individus* (groupements inverses, Beudant; groupements sans parallélisme des systèmes d'axes, Naumann).

Ce mode de groupement est très-important à étudier, parce qu'il se rencontre le plus fréquemment, et qu'il est soumis à des lois remarquables. Il a lieu dans les cristaux hémiédriques, comme dans ceux qui sont holoédriques. Nous examinerons d'abord le cas de deux cristaux seulement; puis celui d'un nombre quelconque de cristaux, mais avec répétition constante de la même loi entre deux individus adjacents.

a. Groupement inverse de deux cristaux.

Il y a ici deux choses à distinguer : premièrement, la position relative des deux individus considérés dans l'espace, et abstraction faite de la manière dont ils ont pu se mettre en contact l'un avec l'autre; et secondement, leur mode particulier de réunion, qui peut varier pour la même position relative, puisqu'il peut consister en une simple apposition, ou bien dans une sorte de pénétration ou d'enchevêtrement.

1° *Position relative des individus.* — Pour déterminer la position relative des deux cristaux, on les suppose d'abord en position parallèle; puis, l'un d'eux restant immobile, on fait tourner l'autre autour d'un certain axe, et d'une certaine quantité angulaire : il est toujours possible de l'amener ainsi dans la position requise par le groupement, et non-seulement il existe toujours un axe, qui permet de passer ainsi de la position parallèle à la position relative marquée par le groupe, mais souvent cela peut se faire de plusieurs manières, c'est-à-dire que l'axe de révolution est susceptible de plusieurs déterminations, en tant qu'on le considère comme servant seulement à passer de l'une de ces positions à l'autre, et que l'on n'a nul égard au mode réel de jonction des individus. Ainsi, dans les systèmes cristallins, autres que le système klinoédrique, il arrive très-souvent qu'un axe de direction donnée peut être changé contre un autre axe perpendiculaire au premier, et qui lui est parfaitement *équivalent*, quant au résultat dont il s'agit.

Un axe de révolution est toujours perpendiculaire à une face cristalline ou parallèle à une arête. Dans le premier cas, qui est

de beaucoup le plus commun, sa direction est indiquée par le signe de la face à laquelle il est perpendiculaire; dans le second cas, elle est marquée par les signes de deux faces, se coupant dans l'arête qui lui est parallèle.

Le plan normal à un axe de révolution correspond presque toujours à une face cristalline : dans le cas contraire, il est perpendiculaire à une arête. Ces plans normaux remplissent souvent le rôle de plans de jonction dans les groupes naturels; et si ces groupes ont toute la perfection dont ils sont susceptibles, si les individus dont ils se composent se sont formés et accrus régulièrement depuis l'origine, chacun de ces plans est alors un plan de symétrie pour le groupe auquel il se rapporte, les deux cristaux élémentaires ayant, par rapport à lui, les mêmes positions relatives que celles d'un objet et de son image à l'égard du miroir plan qui le réfléchit.

Nous avons déjà dit que deux cristaux pouvaient, en restant tournés de la même manière l'un par rapport à l'autre, se joindre par divers côtés, et donner lieu à des groupes d'aspects très différents. Lorsqu'on a égard à un mode spécial de jonction, il y a ordinairement un plan de jonction et un axe de révolution, qui sont indiqués plus particulièrement par la nature du groupe, et, pour cette raison, employés de préférence à formuler sa loi dans les descriptions.

Pour déterminer la position relative des deux cristaux, il ne suffit pas de connaître l'axe autour duquel l'un des cristaux est censé avoir tourné; il faut encore la connaissance d'un autre élément, qui est l'angle de révolution.

L'angle de révolution est toujours de 180°, ou peut toujours être ramené à cette valeur par un choix convenable de l'axe de révolution. C'est pour cela qu'on donne à cet axe le nom d'*axe d'hémitropie*, et au plan qui lui est perpendiculaire, celui de *plan d'hémitropie*. Le plan d'hémitropie est souvent, comme nous l'avons déjà dit, un plan réel de jonction pour les deux cristaux; il peut ne pas jouer ce rôle dans tous les cas.

Dans certains cas cependant, savoir : dans les formes que l'on peut partager en deux moitiés par une section plane dont la figure soit celle de l'hexagone régulier, une rotation de 60° suffirait pour amener l'une des moitiés dans la position convenable : mais, parce qu'on y parviendrait de même en achevant la demi-révolution, ce cas doit rentrer évidemment dans celui des cristaux à renversement complet, où l'angle de révolution est de

180°. C'est pour ce dernier que Haüy réservait exclusivement le nom d'hémitropie; il employait celui de *transposition* pour désigner les doubles-cristaux dans lesquels l'un des individus avait pu tourner de moins que 180°, comme par exemple de 60° ou de 90°. Nous venons de dire que les cas où il admettait une rotation de 60° peuvent être ramenés aux véritables hémitropies, sans qu'on soit obligé de changer l'axe de révolution. On peut y ramener pareillement ceux qu'il expliquait, par une rotation de 90°; mais il faut pour cela partir d'un autre axe, comme on le verra par la description que nous donnerons de ces transpositions, qui se rencontrent rarement, et seulement parmi les cristaux de forme hémiédrique, produisant des macles par entrecroisement.

Il est encore une circonstance qui mérite d'être remarquée : c'est que la symétrie des groupes est en général différente de celle des cristaux simples qui les composent. Tantôt la symétrie d'un double-cristal est d'un degré moins élevé que celle des individus : par exemple, des cristaux du système cubique, qui sont des formes à plusieurs axes égaux, produisent, en s'aggrégeant, des formes à un seul axe, soit rhomboédriques, soit tétragonales; tantôt, et c'est le cas le plus ordinaire, la symétrie du groupe est plus parfaite. Sa forme est holoédrique, tandis que celle des individus est hémiédrique. Ou bien, il y a retour à une symétrie d'un ordre encore plus simple : les formes klinoédriques donnent naissance à des aggrégats klinorhombiques; les formes klinorhombiques passent aux formes orthorhombiques; les formes orthorhombiques aux formes quadratiques, etc. C'est ce que nous aurons occasion de vérifier bientôt, en étudiant les groupes des espèces feldspathiques, ceux des cristaux d'harmotome, de staurotide, etc.

2° *Mode de réunion des individus.* — L'indication de la position relative des cristaux géminés ne suffit pas pour déterminer le caractère du groupement : il faut encore faire connaître si les individus sont réunis l'un à l'autre par juxta-position seulement, ou bien par enchevêtrement, et dans ce cas, en se croisant, ou paraissant se pénétrer mutuellement d'une manière plus ou moins complète.

a. Par simple juxta-position (*hémitropies* proprement dites; groupes hémimorphes, Haid^er; hémitropies et transpositions, Haüy). Un seul plan de jonction, et un plan de symétrie. Les individus paraissent presque toujours incomplets, raccourcis et

comme tronqués par un bout; ils sont placés l'un sur l'autre, ou l'un à côté de l'autre, la masse de chacun d'eux se trouvant tout entière d'un seul côté, par rapport au plan de jonction. Ces groupements sont ceux que l'on nomme vulgairement *groupes en cœur*, *en genou*, *en gouttière*, etc.

Dans le cas où l'axe de révolution est perpendiculaire au plan de jonction, ce qui se voit le plus souvent comme nous l'avons dit, on obtient le groupe de la manière la plus simple en suivant la méthode d'Haüy, c'est-à-dire en faisant passer une section par le centre du cristal, parallèlement à la face modifiante qui détermine sa position, puis faisant tourner l'une des moitiés sur l'autre, jusqu'à ce qu'elle ait accompli une rotation de 180°.

La figure 5, pl. XII, représente la variété *prismatique* du calcaire, avec l'indication de la section *mnpq* parallèle à une face de l'équiaxe. Si l'on suppose que la moitié inférieure fasse une demi-révolution autour d'un axe perpendiculaire à *mnpq*, et par conséquent en glissant sur ce plan, on aura le groupe représenté figure 6, où l'on voit que l'hexagone *mnpq*..... est comme l'équateur du double-cristal, en ce qu'il le partage en deux parties égales et symétriques. Il est clair qu'il est le résultat de la rencontre et de l'aggrégation de deux cristaux, formés semblablement et simultanément de part et d'autre d'un même plan, qui est à la fois un plan de jonction pour les individus, et un plan de symétrie binaire pour le groupe. Les axes principaux des deux prismes se croisent sous un angle déterminé (de 127°34'), facile à calculer d'après la position connue du plan de jonction.

Les caractères auxquels on reconnait une hémitropie, sont: l'existence d'angles rentrants à la surface du groupe, qui sont le résultat même du groupement; et à défaut de ce caractère qui peut manquer dans quelques cas, le changement de la symétrie, qui ne se montre pas de la même manière dans les groupes de cristaux que dans les cristaux simples; l'interruption des clivages, qui ne se prolongent point dans le même sens de part et d'autre des plans de jonction; la disposition anormale des stries superficielles; et enfin la discontinuité de la structure cristalline, qui, dans les cristaux non clivables et transparents, s'annonce par les modifications qu'elle apporte dans les caractères dioptriques du minéral.

On sait que des angles rentrants ne peuvent exister sur les cristaux simples; par conséquent, lorsqu'on observe un angle

de cette espèce à la surface d'un cristal, on peut être sûr que celui-ci est formé par l'aggrégation de deux ou d'un plus grand nombre de cristaux simples. La présence d'un angle rentrant est donc une preuve manifeste de groupement dans les cristaux, et ce caractère, qui ne manque presque jamais dans les hémitropies, les fait reconnaître à la première vue.

Cependant, il est des cas où des groupements se font d'une manière très-régulière, sans donner lieu à aucun angle rentrant: c'est lorsque le plan de jonction, ou la section du cristal hémitrope, a une direction perpendiculaire à l'axe d'un prisme régulier, tel qu'un prisme hexagonal ou quadratique. Il résulte alors du groupement une forme en apparence simple, mais d'une symétrie qui n'est plus celle du système cristallin, propre à la substance. La figure 7, pl. XII, représente un cristal de calcaire spathique de la variété *dodécaèdre*. Supposons-le coupé par un plan horizontal en deux moitiés égales, et supposons que la moitié inférieure tourne autour de son axe de 60° ou de 180°, on aura l'hémitropie, fig. 8, dans laquelle il n'y a point d'angle rentrant. Mais on peut suppléer à ce caractère par l'un de ceux que nous avons indiqués plus haut, par exemple, par l'examen de la symétrie; elle a dû nécessairement être dérangée par l'inversion qu'a subie une partie du cristal prétendu simple. Et, en effet, dans tous les cristaux du système rhomboédrique, qui résultent, comme le cristal figure 7, de la combinaison d'un prisme hexagonal avec un rhomboèdre, les faces de l'un des sommets correspondent toujours, vers les extrémités d'un même pan, aux arêtes de l'autre sommet, ce qui fait que ces pans ont tous la figure d'un pentagone. Dans le cristal représenté figure 8, on voit au contraire les faces des deux sommets se correspondre entre elles, ainsi que les arêtes; et les pans ne sont plus tous semblables, étant alternativement des rectangles et des hexagones. Le cristal, figure 8, considéré comme simple, n'aurait donc plus la symétrie propre au système rhomboédrique, mais bien celle qui appartiendrait aux formes dont le type serait le prisme droit triangulaire à base équilatérale.

Si le prisme de la figure 7, au lieu d'être terminé par un seul rhomboèdre, l'était par un di-rhomboèdre, comme les cristaux de quarz, c'est-à-dire par des pyramides hexaèdres à triangles isoscèles, il ne résulterait de l'inversion supposée aucun changement apparent de forme, ni par conséquent de symétrie. Dans ce cas, il faudrait avoir recours aux caractères physiques

dont nous avons parlé, c'est-à-dire à l'examen des stries, des clivages, ou des propriétés optiques.

Il peut arriver aussi que des angles rentrants aient été produits d'abord par le groupement des cristaux, mais qu'ils se soient effacés ensuite, pendant la période d'accroissement du groupe, par l'extension des faces voisines. Nous aurons occasion de citer de nombreux exemples de ce cas, qui est assez ordinaire dans les cristaux d'amphibole et d'aragonite. On sent très-bien que, par suite de l'accroissement inégal qu'éprouvent les différentes parties d'un cristal, les rapports de dimension des faces sont sujets à varier, et que certaines faces peuvent prendre une extension démesurée aux dépens de leurs voisines, qui se rétrécissent peu à peu et finissent par s'évanouir complètement. Si donc les faces qui entourent l'angle rentrant, s'accroissent outre mesure, les facettes qui composent cet angle diminueront et pourront à la fin disparaître. Mais ici, comme dans le cas examiné précédemment, on aura encore la faculté de recourir aux caractères subsidiaires; car il est contre toute vraisemblance qu'ils fassent défaut tous à la fois.

b. Par enchevêtrement ou entrecroisement (*macles;* groupes amphimorphes, Haid[er]; groupes en croix). Plusieurs plans de jonction, de directions différentes; individus formés autour d'un centre ou d'un axe commun, incomplets et comme échancrés par le milieu, et placés l'un dans l'autre, de manière à combler les vides produits par les échancrures.

Ce cas ne diffère du précédent, qu'en ce que les deux cristaux, tels que MNAOC, M'N'DOA (fig. 9), qui se sont produits dans une position inverse de part et d'autre du plan commun AO, se continuent au-delà du point O, point de centre et d'origine de la macle, en sorte que chacun d'eux s'étend des deux côtés du plan de jonction AOB. La figure 9 montre clairement qu'il résulte de ce prolongement un second plan de jonction COD, perpendiculaire au premier, et passant comme lui par le centre O du groupe : les deux cristaux s'entrecroisent et s'entrecoupent l'un l'autre en deux parties, qui restent séparées et discontinues, si ce n'est dans l'axe, qui passe par le point O, et qui est l'intersection des deux plans de jonction. Par la disposition des stries, qui est la même pour les deux moitiés d'un même cristal, et différente dans les deux cristaux, on reconnait aisément quelles sont les parties du groupe qui appartiennent à chaque individu; et si par la pensée on sépare les deux élé-

ments de ce groupe, on verra qu'ils sont incomplets dans leur milieu, et présentent chacun une double échancrure, ainsi que le font voir les figures 10 et 11.

Ce genre de groupement s'observe très-communément dans une espèce de silicate alumineux, la staurotide ou pierre de croix, ainsi nommée à cause de la tendance remarquable qu'ont ses cristaux à se réunir deux à deux en groupes, dont la forme est tantôt une croix qui paraît rectangulaire (fig. 9), tantôt une croix obliquangle (fig. 12). Nous reviendrons plus loin sur ces groupes, pour les décrire avec tout le soin qu'ils exigent, et signaler les caractères de symétrie qui les distinguent. Le carbonate de plomb ou céruse, l'harmotome, et diverses autres substances du système rhombique, présentent aussi des croisements analogues.

Des cas d'enchevêtrement de deux cristaux semblables s'observent fréquemment dans les systèmes cubique et rhomboédrique, avec la circonstance de plus de deux plans de jonction. Ainsi, dans le système cubique, deux octaèdres réguliers (fig. 13) sont souvent groupés par pénétration réciproque, de manière que les deux individus ont de commun un axe perpendiculaire à deux faces opposées, c'est-à-dire un axe rhomboédrique, et que l'un a tourné autour de cet axe de 180° par rapport à l'autre. C'est ce qui se voit dans les cristaux de fer magnétique et de galène. Les octaèdres de blende, malgré leur caractère de forme composée, présentent un groupement exactement semblable. Les cubes de fluorine, de pyrite et de cuivre panaché, se groupent aussi suivant la même loi, comme le montre la figure 14. Il en est de même des tétraèdres réguliers, dans le cuivre gris (fig. 15), et des rhomboèdres dans la chabasie et la phénakite (fig. 16). Dans tous ces cas de croisement de deux cristaux seulement, il existe trois plans de jonction qui s'entrecoupent dans un axe rhomboédrique, en faisant entre eux des angles de 60°.

Des groupements par entrecroisement, et que Haüy expliquait par une transposition de 90°, se rencontrent quelquefois parmi les formes hémiédriques, et surtout parmi celles qui sont originaires du cube. La figure 17 représente un groupe de deux tétraèdres réguliers, placés l'un par rapport à l'autre à angle droit, autour d'un axe commun, passant par les milieux de deux arêtes opposées : c'est ce qui s'observe dans les cristaux de cuivre gris. Les tétraèdres peuvent être épointés, et le groupe se présente alors sous la forme d'un octaèdre régulier, qui aurait été

creusé en gouttière sur chacune de ses arêtes (fig. 18). Enfin, le même groupement peut avoir lieu dans des tétraèdres modifiés chacun par vingt-quatre facettes conduisant à un tétrahexaèdre ou scalénoèdre tétraédrique (fig. 19) (1). Les sphénoèdres ou tétraèdres quadratiques du cuivre pyriteux se croisent aussi rectangulairement, de manière que leurs axes principaux aient une direction commune.

Les hexadièdres ou dodécaèdres pentagonaux de la pyrite se groupent aussi deux à deux par pénétration, et avec transposition de 90°; la figure 20 représente le groupe très-remarquable qui résulte de ce croisement, et que l'on trouve à Minden et à Vlotho, en Westphalie : ces macles pyriteuses sont souvent changées en limonite; on les connaît en Allemagne sous le nom d'*eisernes Kreuz* (croix de fer). A chaque face du cube correspondent quatre pyramides trièdres, disposées en façon de croix de Malte. C'est M. Weiss qui a décrit et figuré le premier cette curieuse association, dont nous croyons qu'aucun auteur français n'a fait mention jusqu'ici, à l'exception de Romé de l'Isle.

Quelquefois les faces du cube s'ajoutent à celles du dodécaèdre, en présentant les stries, qui sont si ordinaires et si caractéristiques dans la pyrite, savoir des stries disposées sur chaque face dans un seul sens, parallèlement à une arête, et sur trois faces adjacentes dans des directions croisées à angles droits. Et lorsque dans cette combinaison les faces du cube deviennent dominantes, l'aggrégat prend alors l'aspect de la figure 21, c'est-à-dire celui d'un cube presque complet, dont les faces sont marquées de deux systèmes différents de stries, correspondant aux deux individus, et se terminant aux lignes de suture ou de démarcation de ces éléments.

Les groupements de formes hémiédriques, que nous venons de décrire, et que pour un moment nous avons expliqués par des transpositions de 90° autour d'un axe octaédrique, comme le faisait Haüy, peuvent se ramener à la loi générale des hémitropies, en choisissant un autre axe de révolution. Il est facile de voir, en effet, que si l'on part de la position parallèle des deux cristaux, et que l'on fasse tourner l'un d'eux de 180° autour d'un axe perpendiculaire à une face du rhombododécaèdre, c'est-à-

1) Suivant Mohs, un groupement semblable à celui de la figure 19 aurait été observé dans le diamant, et c'est une des raisons pour lesquelles ce minéralogiste a cru devoir rapporter les formes du diamant au système tétraédrique.

e à l'un des axes binaires, on arrivera au même résultat que la première hypothèse; et quoique le dernier moyen puisse être moins simple au premier abord, il doit être adopté de férence, en ce qu'il rentre dans la loi commune.

Dans tous les exemples de croisement cités jusqu'ici, il y avait jours à la surface des angles rentrants, plus ou moins sensis, qui faisaient de suite reconnaître le groupement, et empêaient de prendre l'aggrégat pour un cristal simple. Mais il peut iver ici, comme pour les groupements par juxta-position, que ite trace d'angles rentrants disparaisse; et dans ce cas, il faudra oir recours à d'autres caractères distinctifs, tels que le changent de la symétrie, la disposition anormale des stries, la discontilité des clivages et de la structure à l'intérieur, etc. Ainsi, dans xemple représenté fig. 21, si l'on suppose que les faces du cube nnent une extension relative de plus en plus considérable, es finiront par faire évanouir complètement les facettes du décaèdre pentagonal, et à cette limite, le groupe aura pris pparence d'un cube complet, et par conséquent d'un cristal nple (fig. 22); mais les sutures correspondantes aux diagonales s faces, et les stries disposées en divergeant de part et d'autre ces sutures, comme dans la figure 21, suffiront pour prouver e ce prétendu cube est le résultat de la réunion, sous une même veloppe, et de l'enchevêtrement complet de deux cubes, duits chacun à la moitié de son volume, par une alternance de des et de pleins, et se complétant l'un l'autre.

Un autre exemple remarquable de croisement sans angles rennts nous est offert par les cristaux de scheelite de Schlackenld en Bohême, dont la figure 23 représente la forme à l'état isolement. Ces cristaux, qui dérivent d'un prisme droit à base rrée, ont pour forme dominante un quadroctaèdre aigu P, P; ais ils sont soumis à une hémiédrie rotatoire, dans un sens rpendiculaire à l'axe, ce que l'on reconnaît à un double caactère : d'abord, à ce que les faces P sont striées obliquement, toujours dans le même sens, en tournant autour de l'axe, ur celles qui font partie d'une même pyramide; ensuite, à ce ie les angles solides latéraux portent, outre les facettes *n*, a un quadroctaèdre normal en position inverse avec le premier, autres facettes *g*, *g* et *a*, *a*, qui se montrent de biais d'un seul té, et appartiennent à des octaèdres de position anormale, st-à-dire à des di-octaèdres ou scalénoèdres réduits à la moitié nombre de leurs faces. La figure 24 représente un groupe-

ment par hémitropie et entrecroisement de deux cristaux semblables : les deux individus sont groupés par les plans verticaux parallèles aux arêtes horizontales ; et l'un d'eux est censé avoir tourné de 180° autour d'un axe perpendiculaire à l'un de ces deux plans de jonction.

Nous citerons encore un bel exemple de cristaux, offrant, comme les précédents, l'apparence d'un cristal unique, avec une structure intérieure complexe, parce qu'ils résultent de l'enchevêtrement de deux individus semblables, dont les axes principaux coïncident, tandis que leurs axes secondaires ont fait entre eux un échange de position. Nous le trouvons dans les curieux cristaux de quarz-hyalin, observés et décrits par M. Gustave Rose, et provenant de Jœrischau, près de Striegau, dans le Riesengebirge. Ces cristaux ont la forme ordinaire des cristaux simples de la même substance (fig. 25, pl. XIII); mais, dans chaque cristal simple, la pyramide terminale est la combinaison de deux rhomboèdres P et *z*, géométriquement égaux, et qui diffèrent physiquement, ou par la génération de leurs faces : aussi, remarque-t-on souvent que les faces P et *z* se distinguent entre elles par une différence d'étendue, ou bien par une différence d'éclat, les faces *z* se montrant ternes relativement aux faces P, qui paraissent généralement plus brillantes. Dans les macles de Jœrischau, chaque face de la pyramide offre une ligne de suture entre les parties des deux individus croisés dont les faces se sont réunies sur le même plan, et ces parties voisines et de même niveau appartiennent l'une à une face P, et l'autre à une face *z*, ce qui se reconnaît aisément par leur différence d'éclat, ou bien par l'absence sur l'une des stries fines ou autres accidents de texture qu'on observe sur l'autre. Ces lignes de suture se prolongent sur les faces latérales *r*, où elles deviennent quelquefois très-sensibles par la discontinuité des cannelures horizontales, qui forment le caractère le plus habituel des faces verticales, dans les cristaux de quarz. Il est clair que, dans ce cas, comme dans celui des cubes de pyrite de la figure 22, on pourrait tout expliquer, en partant d'un seul cristal simple, et en admettant que, dans ce cristal, une partie des molécules ait tourné autour de l'axe principal de 60°.

Les groupements de formes hémiédriques, que nous venons d'expliquer par des transpositions ou des hémitropies d'individus, en tout point semblables de forme et de structure, et par conséquent susceptibles d'être ramenés à une parfaite coïnci-

dence, ont été considérés sous un autre point de vue par plusieurs cristallographes. M. Naumann y voit les résultats d'une loi particulière de groupement, applicable seulement aux cristaux hémiédriques, et suivant laquelle deux formes hémiédriques *complémentaires* s'uniraient en conservant le parallélisme de leurs axes dans la position relative où, par une combinaison ordinaire, elles reproduiraient la forme holoédrique dont on les suppose dérivées. Ce point de vue, qui semble être la conséquence de la manière, purement abstraite, dont on envisage l'hémiédrie en Allemagne, peut donner lieu aux observations suivantes. Dans les entrecroisements de cristaux de cuivre gris, de pyrite ou de schéelite, les éléments du groupe sont, comme nous l'avons dit, en tout point semblables, et ne diffèrent que par leur position : l'un d'eux a tourné de 90°, ou de 180° par rapport à l'autre ; par conséquent, le système de ses axes a éprouvé lui-même un changement, et bien que chacun des axes rectangulaires de l'un des individus retombe sur l'un des axes rectangulaires de l'autre individu, on ne peut pas dire que les deux systèmes d'axes soient parallèles, si l'on tient compte de la polarité des axes, et de la valeur différente de leurs côtés, dont les homologues ne se correspondent plus. Il en est, dans ce cas, des axes des cristaux comme des rayons de lumière qui suivent une même direction, et qui sont polarisés en sens différents ; ils coïncident comme lignes géométriques, mais non comme lignes physiques, consistant en une suite de petits mouvements vibratoires de sens déterminé.

Il est bien vrai qu'à chaque cristal hémiédrique répond toujours un autre cristal hémiédrique, de forme complémentaire, dont les faces peuvent exister seules, ou en combinaison avec celles du premier. Ce cristal offre à l'intérieur la même structure, mais ses faces terminales ont une texture moléculaire, une valeur physique différente. Si l'on cherchait à grouper par entrecroisement des portions de ces deux cristaux, en maintenant le parallélisme rigoureux de leurs axes, ces portions se raccorderaient entre elles de manière qu'il n'y aurait point de discontinuité de structure à l'intérieur ; on aurait, dans ce cas, un groupement, avec *parallélisme réel des systèmes d'axes*, de deux individus, non identiques comme ceux qui proviennent d'une même modification, mais de deux individus appartenant à des modifications différentes, et tendant à produire une combinaison, au lieu d'une forme simple. Ce serait toute autre chose

que ce que nous offre la nature dans les exemples précités, et l'analogue de ce qu'on voit dans le quarz, où deux rhomboèdres de modifications diverses, égaux pour la forme, mais différents pour la structure, se combinent en un di-rhomboèdre, qui simule le di-hexaèdre du système hexagonal holoédrique, sans en avoir la structure ni la symétrie. M. Bravais, dans ses Etudes cristallographiques, envisage le cas dont il s'agit d'une autre manière; il y voit un exemple, non d'hémitropie réticulaire ou cristalline, mais de simple hémitropie ou transposition des molécules autour de leurs centres, avec conservation du réseau primitif; c'est ce qu'il appelle une macle par *hémitropie moléculaire*. Ce point de vue est très-admissible; il est certain que l'on peut rendre parfaitement compte du groupe, de forme cubique, représenté figure 22, en supposant que dans un cube ordinaire de pyrite, une moitié du nombre total des molécules reste fixe, tandis que l'autre moitié subit une rotation de 90° autour d'un des trois axes rectangulaires. Si les choses se passaient ainsi, il n'y aurait aucune discontinuité dans les files moléculaires, à partir des plans de jonction.

Dans tous les exemples de groupements que nous avons considérés jusqu'ici, l'axe de révolution se trouvait toujours perpendiculaire au plan de jonction des cristaux réunis; mais nous avons dit que, dans quelques cas, l'axe de révolution était parallèle au plan de jonction : le plan normal est alors le véritable plan d'hémitropie. Cela se voit dans les cristaux qui dérivent de prismes à base oblique. Le gypse, l'orthose, nous en offrent de remarquables exemples.

La figure 26, pl. XIII, représente une des variétés les plus ordinaires du feldspath orthose (la variété quadri-hexagonale, Haüy). Nous la considérerons ici comme dérivant d'un prisme klinorhombique, dont la base serait P, et les pans T et *l* (ces lettres sont celles que portent les mêmes faces dans les figures d'Haüy). Le plan M est parallèle à la section klinodiagonale de ce prisme. On voit fréquemment deux cristaux de cette forme groupés entre eux, de manière que le plan de jonction est parallèle à M, et que l'axe de révolution est aussi parallèle à cette dernière face, car il n'est rien autre chose que l'axe vertical ou axe principal du système. Supposons donc un second cristal tout-à-fait semblable à celui de la figure 26, placé d'abord à côté de lui en position parallèle : imaginons qu'on le fasse tourner de 180° autour de la verticale; il sera vu alors tel que le re-

présente la figure 27. Cela posé, faisons mouvoir le second cristal parallèlement à lui-même, de façon qu'il se réunisse au premier par les faces M. Nous aurons ainsi une espèce de groupement très-commun, qui a lieu tantôt par simple juxta-position, tantôt, et le plus souvent, avec croisement et pénétration partielle des deux individus; et selon que le second cristal sera venu joindre et pénétrer le premier par la face latérale de droite, ou par celle de gauche, on aura le groupe représenté figure 28, ou celui de la figure 29, lesquels diffèrent l'un de l'autre sous le rapport de la forme, comme un objet et son image vue dans un miroir plan, ou comme les polyèdres inverses de la géométrie. Cette différence remarquable a été signalée pour la première fois par M. Weiss. Ainsi, dans les systèmes à axes obliques, la même loi de groupement peut produire deux groupes inversement semblables, qu'on peut appeler l'un droit et l'autre gauche. Cette distinction toutefois, dans le système klinorhombique, dépend de la circonstance d'une pénétration partielle des deux individus, ce qui est le cas le plus habituel; elle disparaîtrait, si la pénétration était complète, c'est-à-dire si les deux cristaux s'étaient avancés suffisamment l'un à travers l'autre, pour que leurs sections klinodiagonales fussent en parfaite coïncidence. Dans ce cas, le groupe résultant serait unique. Ce groupement s'observe fréquemment dans les cristaux minces de feldspath vitreux des trachytes, et de la manière la plus distincte dans les gros cristaux d'orthose des porphyres d'Auvergne, et des granites d'Elnbogen, près Karlsbad en Bohême.

Pour expliquer ce groupement des cristaux d'orthose, nous avons admis que l'axe d'hémitropie était l'axe vertical, et, dans ce cas, il s'est trouvé ne plus satisfaire à la condition générale d'être perpendiculaire à une face cristalline; il était seulement parallèle à celle que nous avons considérée jusqu'ici comme plan d'hémitropie. Mais on arriverait au même résultat, en prenant pour axe de révolution une ligne horizontale, perpendiculaire à la section qui passe par les diagonales horizontales des bases, ou à la face *k* d'Haüy, qui serait alors le véritable plan d'hémitropie; et, dans ce cas, l'axe d'hémitropie rentrerait dans la condition commune, puisqu'il serait normal à une des faces qui ont une relation des plus simples avec la forme fondamentale.

Les cristaux de gypse de la variété trapézienne (Haüy) se montrent aussi très-souvent soumis à la même loi de groupe-

ment, comme l'indique la figure 30. Cette circonstance se remarque dans les échantillons de cette variété, que l'on trouve à Auteuil près Paris, à Bex en Suisse, à Hall en Tyrol, à Hallein dans le Salzbourg, et à Saalfeld en Thuringe.

6. Groupement inverse de plusieurs cristaux, avec répétition constante de la même loi.

Le groupement par hémitropie, avec répétition de la même loi, peut s'observer dans un assemblage plus ou moins considérable de cristaux de même espèce et de même forme, ordonnés en série par rapport à un axe, ou bien réunis autour d'un centre ou d'un cristal intermédiaire, servant de tige ou de support commun à tous les autres. Les résultats de ce groupement répété sont très-différents, selon que les plans de jonction successifs sont tous parallèles, ou qu'ils sont inclinés entre eux.

Premier cas. — Parallélisme continu des faces de jonction. Groupements en série rectiligne. Soit 1 (fig. 31) la coupe transversale d'un prisme rhombique, avec lequel un second prisme 2 soit réuni en sens inverse, la face de jonction ab étant un des pans du premier prisme, et l'axe de révolution étant une droite mn perpendiculaire à ab. Supposons maintenant qu'un troisième prisme soit réuni de la même manière avec le second, un quatrième avec le troisième, et ainsi de suite. Tous les individus seront superposés en série linéaire, parallèlement à l'axe mn, et le nombre de ceux qui pourront être groupés ainsi n'aura pas de limite. On voit, de plus, que tous les individus pris de deux en deux sont en position directe ou parallèle.

Lorsque ces individus sont en très-grand nombre, les surfaces du groupe qui sont parallèles à mn, se composent d'une succession d'angles saillants et rentrants, qui leur donne un aspect dentelé. Il arrive ordinairement que les éléments du groupe subissent un raccourcissement considérable dans le sens de l'axe mn, en sorte qu'ils apparaissent comme des lamelles plus ou moins minces ; dans ce cas, les surfaces dont nous venons de parler ressemblent à des faces ordinaires de cristaux, qui seraient striées avec beaucoup de régularité dans un sens parallèle à la direction des plans de jonction. Quelquefois, les éléments extrêmes sont plus développés, les intermédiaires, au contraire très-amincis, et le tout simule un cristal simple, dans la masse duquel on aurait inséré des lames ou tranches de la

: substance, reconnaissables seulement aux stries qui ré-
ıt de leurs positions alternativement renversées.
ıucoup d'espèces minérales nous offrent des exemples d'un
groupement répété, avec les stries de composition qui le
:érisent. Nous citerons entre autres le calcaire, l'aragonite,
ldspaths klinoédriques, la chalkopyrite, le fer oligiste, le
don, etc. Les masses de calcaire rhomboïdal d'Islande sont
:nt formées de lames groupées par des faces parallèles à
: de l'équiaxe ou premier rhomboèdre tangent; aussi sont-
fortement striées sur deux faces opposées, parallèlement
;randes diagonales de ces faces. Les beaux cristaux d'ara-
.e de Bohême offrent souvent aussi, sous l'apparence d'un
ıl simple, une réunion de cristaux laminiformes, alternati-
:nt hémitropes et dont les faces de jonction successives sont
:s parallèles entre elles, et à l'un des pans des cristaux extrê-
La même chose a lieu aussi dans certaines variétés de py-
ıe diopside. Dans les cas semblables, les éléments extrêmes
en position inverse ou directe, selon que les tranches inter-
:s sont en nombre pair ou impair.
ıis c'est surtout dans les feldspaths albite et labrador, que
nre de structure composée se rencontre le plus fréquem-
t, et il détermine, dans les masses cristallines de ces espèces,
nature particulière de stries, qui constitue l'un de leurs
ctères les plus marqués et les plus habituels. Dans le cuivre
tcux, de minces segments d'octaèdres sont quelquefois grou-
ɔar l'une de leurs faces, et l'hémitropie se répète de manière
ɔduire un aggrégat stratifié, en forme de prisme hexagonal,
les pans seraient cannelés parallèlement aux bases.
:s masses cristallines à texture stratiforme, que l'on rencontre
ent dans les espèces du corindon, du fer oligiste et du py-
ne sahlite, doivent presque toujours cet aspect à des fissures
lans de séparation, que l'on a pris pour des clivages, et qui
paraissent être que des faces de groupement, car ces préten-
clivages ne peuvent pas se continuer à volonté et se répéter
finiment dans la portion de masse comprise entre deux quel-
ques de ces fissures, comme cela a toujours lieu dans les cas
livage proprement dit. L'existence d'un pareil mode de di-
ın, comme résultat d'un groupement répété, est un fait im-
ant, dont on n'a pas toujours tenu suffisamment compte, et
a donné lieu à de fréquentes méprises dans la détermina-
des clivages de certaines espèces.

Quelquefois il arrive que l'homogénéité de structure d'un rhomboèdre de corindon, ou de spath calcaire, n'est interrompue que par une seule lame de la substance, qui se trouve retournée dans l'intérieur de la masse : cette lame hémitrope est tantôt parallèle à l'une des faces du rhomboèdre (corindon), tantôt parallèle à une face du rhomboèdre tangent, ou bien perpendiculaire à l'axe (calcaire spathique).

Deuxième cas. — Faces de jonction inclinées entre elles. Groupements en série circulaire. Soient 1, 2, 3, 4, 5... (fig. 32), les coupes transversales de prismes droits à base rhombe, *tous* égaux entre eux; les deux premiers se groupent par les faces latérales correspondantes à ab; le troisième est groupé semblablement avec le deuxième par les faces ab'; le quatrième avec le troisième par les faces ab'', et ainsi de suite; la loi de groupement reste la même d'un individu quelconque au suivant, mais les plans de jonction ne sont plus parallèles, comme dans le cas de la figure 31 ; ils sont inclinés entre eux, et disposés en rayons autour d'un axe commun. Les éléments du groupe forment donc dans ce cas un arrangement circulaire ou une série rentrante sur elle-même; et il est facile de voir que la répétition des éléments a ici une limite nécessaire qu'elle ne saurait dépasser : le nombre total de ceux qui peuvent être assemblés de cette manière à l'état de cristal complet, est égal à $\frac{360°}{\alpha}$, α désignant l'angle du prisme élémentaire, qui est situé en a. Autant il y aura d'unités comprises dans le nombre fractionnaire $\frac{360°}{\alpha}$, autant on pourra réunir de prismes entiers autour de l'axe de groupement. Si 360° était divisible exactement par α, on pourrait assembler un certain nombre de prismes, de manière à remplir tout l'espace circulaire autour de a; mais c'est là une circonstance qui ne saurait se rencontrer que par hasard. Il arrive généralement qu'il reste un vide entre le premier cristal et le dernier; ou bien ce vide est comblé, soit par l'extension irrégulière que subit la masse de chacun de ces deux individus, soit par un nouvel élément surnuméraire, qui se forme sur le dernier cristal, et qui demeure incomplet, pénétrant ou enveloppant en partie le premier individu, soit enfin par deux cristaux fragmentaires qui s'ajoutent l'un au premier, l'autre au dernier des cristaux complets, en se faisant mutuellement obstacle dans leur accroissement et se limitant à un plan commun, déterminé

ar leur rencontre accidentelle. Il est clair que les plans de ce enre n'étant pas le résultat d'un groupement immédiat, sont, n général, et sauf quelques cas particuliers, des faces de joncon anormales, qui ne répondent à aucune loi de dérivation orinaire, et ne peuvent être comparées qu'à celles que produit : hasard des positions dans les cristaux irrégulièrement aggrés, et qui se sont formés les uns à côté des autres d'une maière indépendante.

Pour qu'une loi de groupement inverse puisse se répéter entre lusieurs cristaux semblables, avec un arrangement circulaire de es cristaux et une disposition rayonnée de leurs plans de jonction, il faut que le groupement ait lieu par des faces telles, que :haque individu en présente plusieurs de la même espèce dans les directions différentes. De cette condition indispensable, on peut conclure qu'une pareille répétition ne pourra jamais se renontrer parmi les cristaux dont les formes se rapportent au sysème klinoédrique.

Si les individus qui se groupent circulairement autour d'un ıxe commun, au lieu d'être des prismes droits, sont terminés ar des sommets cunéiformes ou pyramidaux, les parties du roupe situées vers les extrémités de l'axe de groupement préenteront des angles rentrants, tantôt sous forme de cannelures livergentes, tantôt sous celle d'une pyramide creuse ou d'un ımbilic central. Par exemple, dans la variété d'aragonite que Iaüy nomme *cunéolaire* (fig. 33), on voit un groupement de uatre prismes pyramidés, dont deux sont complets, et les deux utres fractionnaires. Dans la sperkise *péritome* du même aueur, des octaèdres rectangulaires à axe horizontal, ou, ce qui st la même chose, des prismes rhombiques droits à sommets unéiformes se groupent circulairement, par juxta-position, en 'appliquant les uns contre les autres par deux de leurs pans lus élargis que les autres; ce groupement répété se compose le trois, quatre, et souvent même de cinq individus, comme le nontre la figure 34. Dans le cas représenté par cette figure, uatre cristaux se disposent ainsi autour d'un axe commun, par es angles aigus de leurs prismes, lesquels sont de 74°. Il reste in vide angulaire de 64°, qu'un cinquième individu remplit rdinairement, mais dans lequel il ne peut se développer que l'une manière incomplète. L'angle rentrant latéral, formé par es pans de deux individus voisins, est d'environ 148°; cet angle i'existe pas toujours; mais à la partie supérieure du groupe on

aperçoit ordinairement une pyramide creuse pentaèdre, très-surbaissée; et la démarcation des individus est établie d'une manière très-nette par des stries superficielles. En général, la réunion de plusieurs cristaux semblables autour d'un axe commun, par des faces prismatiques, donnera des groupements analogues aux précédents, et qui peuvent être compris sous les dénominations générales de groupes *en roses* ou *en étoiles*.

Lorsque des cristaux se composent d'un prisme et de sommets cunéiformes ou pyramidaux, si le groupement a lieu par juxta-position de faces pyramidales, et qu'il se répète d'un cristal à un autre, comme cela se voit dans le titane rutile, il en résulte des groupes géniculés, ou en forme de cadres polygonaux, semblables à celui représenté figure 35.

Dans les exemples qui précèdent, nous avons supposé que le groupement se répétait en série continue, toujours dans le même sens; mais il peut arriver qu'il se répète sur plusieurs faces ou plusieurs bords identiques d'un même individu, d'un même cristal central ou axile, faisant fonction en quelque sorte de tige ou de support à l'égard des autres. Cette circonstance donne lieu à des groupes symétriques que l'on appelle groupes *en gerbes*, *en faisceaux*, *en bouquets*, etc. Ainsi, dans le tellurure de bismuth, appelé bornine et tétradymite, les cristaux qui ont la forme de rhomboèdres aigus basés, sont presque toujours groupés au nombre de quatre, comme le représente la figure 36; dans l'argent rouge, ce mode de groupement est très-fréquent, et la figure 37 en offre un bel exemple. On y voit trois cristaux groupés autour d'un quatrième cristal, et ce groupement est un de ceux qui semblent satisfaire à la loi particulière de Mohs, dont il a été question page 190; plusieurs cristallographes admettent, en effet, que l'axe d'hémitropie est parallèle à une des arêtes culminantes du rhomboèdre z, et que le plan d'hémitropie est le plan normal à cette même arête, sans être une face cristalline proprement dite (1). Deux faces z d'un cristal coïncident avec deux faces $z'z'$ d'un autre cristal; et le plan de jonction est trois fois répété. Dans la hausmannite (fig. 38), dont les cristaux simples ont la forme d'octaèdres allongés à base carrée, quatre octaèdres, P', P'', P''', P^{iv} se groupent avec un cin-

(1) On pourrait expliquer ce cas d'une autre manière, en supposant que l'axe d'hémitropie fût perpendiculaire à une face du rhomboèdre tangent au rhomboèdre z, et en même temps parallèle au plan de jonction, lequel ne répondrait pas à une face.

quième octaèdre P, formant la tige de l'assemblage, le mode de groupement que l'on remarque entre P et P' se répétant sur les bords culminants de l'octaèdre central.

Les figures 39 et 40, pl. XIII, représentent des groupes cruciformes ou stellaires de céruse ou carbonate de plomb. Dans le premier groupe, fig. 39, deux prismes rhomboïdaux terminés par des sommets cunéiformes se réunissent de manière que les faces M et M' des deux individus sont dans le prolongement l'une de l'autre, et qu'il y a deux plans de jonction perpendiculaires l'un à l'autre, dont l'un parallèle à M correspond par conséquent à une face cristalline, et dont l'autre est perpendiculaire à une arête sans correspondre à une face. Dans ce cas, comme dans beaucoup d'autres, les deux lois de groupement, celle de Haüy et celle de Mohs, existent à la fois, et sont en quelque sorte le complément l'une de l'autre. On peut donc faire application de toutes les deux : si l'on choisit pour face d'hémitropie, celui des deux plans de jonction qui est parallèle à M, et pour axe la ligne *pq* qui lui est perpendiculaire et se trouve comprise dans le second plan, on expliquera le groupement d'après la loi ordinaire d'Haüy et de Weiss ; si l'on prend, au contraire, pour face d'hémitropie, l'autre plan de jonction, l'axe d'hémitropie sera parallèle à une arête, sans être nécessairement perpendiculaire à une face, et le groupement devra être expliqué d'après la seconde loi, celle de Mohs. Mais on doit s'en tenir au premier mode, qui paraît plus simple, et a de plus l'avantage de rentrer dans le cas général.

Dans la figure 40, on voit un individu central, avec lequel sont groupés de la même manière deux autres individus, l'un à droite et l'autre à gauche. Il en résulte une étoile à six branches, sinon régulière, du moins très-symétrique. Un des individus peut être considéré comme le support commun ou la tige des deux autres, qui sont également inclinés sur lui.

B. *Groupements déterminés par une loi purement géométrique.*

Il peut arriver que des cristaux de même nature et de même forme se réunissent en nombre fixe autour d'un centre, de manière à laisser un vide au milieu d'eux, et qu'il en résulte une forme régulière, plus simple et plus symétrique que celle des cristaux élémentaires qui lui ont donné naissance. Tel serait le

cas des cristaux de fer oligiste, en octaèdres réguliers, que M. Scacchi a observés au Vésuve, et dans lesquels il voit des groupements de très-petits cristaux lamelliformes, qui ne seraient que des rhomboèdres basés, assemblés huit par huit autour d'un même centre, et dont les axes principaux convergeraient vers ce point, en se coupant sous des angles de 70° 32', tandis que leurs bases équilatérales seraient parallèles aux faces de la forme octaédrique résultante. Ces assemblages de huit cristaux élémentaires peuvent se subdiviser en quatre doubles-cristaux, formés chacun de deux éléments parallèles, distants l'un de l'autre et disposés en sens inverse; la loi ordinaire des hémitropies aurait présidé à cette disposition des éléments pris deux à deux, et quatre hémitropies semblables, conjuguées entre elles, formeraient un petit groupe élémentaire, de forme octaédrique. On aurait ainsi un exemple du passage d'un système cristallin à un autre, par un groupement répété de cristaux de même forme, sans parallélisme de leurs axes. Les gros cristaux paraissent formés par l'apposition d'une multitude de petits groupes octaédriques de ce genre; leurs faces laissent voir un grand nombre de lignes relevées ou crêtes saillantes, parallèles aux arêtes et se croisant entre elles sous des angles de 60°; ces lignes sont formées de cristaux minces rhomboédriformes, et celles qui sont situées sur l'une des faces et dirigées parallèlement à l'arête d'intersection de cette face avec une des faces voisines, résultent toujours de cristaux dont les bases sont parallèles à cette seconde face et non à la première.

Ces groupes fort singuliers ont été trouvés par M. Scacchi, dans les fissures de l'ancien cratère de Cancherone et des rochers de la Somma, au Vésuve (1).

SECONDE DIVISION.

Groupements d'individus de même nature, mais de forme et de structure inversement semblables.

Ces groupements sont très-rares, et, jusqu'à présent, n'ont encore été observés que dans une seule espèce minérale, dans les cristaux de quarz. On a vu, p. 142, que ces cristaux proviennent d'une tétartoédrie des formes propres au système hexagonal, ou d'une hémiédrie rotatoire de celles qui appartiennent au sys-

(1) *Memorie Mineralogiche e Geologiche*, di Archangelo Scacchi; tome Ier, p. 33; Naples, 1842.

tème hémiédrique ordinaire, d'où résultent des formes conjuguées, que nous avons appelées des plagièdres, et qui ne sont point superposables, en sorte qu'on peut observer dans l'espèce, les plagièdres *droits* et des plagièdres *gauches*. Ces formes de symétrie semblables, mais inverse, doivent faire présupposer qu'il existe une différence de même genre dans la structure intérieure des cristaux, ce que confirme en effet, comme on le verra plus loin, l'analyse qu'on peut faire de cette structure par la lumière polarisée. D'après ce que nous avons dit de l'accord qu'il doit y avoir entre la forme de la molécule, la structure de la masse et la configuration extérieure d'un cristal, il faut bien qu'une différence analogue se retrouve dans les molécules des quarz droits et des quarz gauches. Ainsi, l'espèce du quarz nous offre cette particularité très-curieuse, qu'elle a pour bases deux sortes de molécules physiques égales et inversement semblables, non superposables entre elles, mais pouvant passer de l'une à l'autre par une inversion du polyèdre moléculaire, c'est-à-dire par une disposition des atomes autour de l'axe de la molécule, qui se montre la même, tantôt à droite, tantôt à gauche. Le quarz est donc une espèce à deux sortes de molécules, pouvant exister ensemble ou séparément, des molécules droites et des molécules gauches; et ces molécules peuvent constituer en même temps, ou successivement, un même réseau ou même assemblage de points matériels, en les supposant réduites à leurs centres de gravité.

L'existence de ces molécules doubles nous conduit à distinguer une nouvelle classe de groupements ou de macles, qu'on peut appeler, avec M. Bravais (1), des *macles par inversion moléculaire*. On les observe assez fréquemment dans les cristaux de quarz qui proviennent du Brésil. Elles ont lieu, tantôt avec continuité des réseaux cristallins, et, dans ce cas, on a un cristal en apparence unique, qui est formé dans certaines parties de molécules droites et dans d'autres de molécules gauches, les parties droites et gauches pouvant se reconnaître et se distinguer aisément par la lumière polarisée; tantôt avec discontinuité des réseaux, et, dans ce cas, c'est une hémitropie réticulaire, avec une circonstance de plus, l'inversion des polyèdres moléculaires dans les parties correspondantes du groupe.

Ce phénomène remarquable de l'inversion moléculaire, si rare jusqu'à présent parmi les cristaux naturels, est assez com-

(1) Voir ses *Études Cristallographiques*, p. 156, dans le XXXIVe cahier du *Journal de l'École polytechnique*.

mun dans ceux qui appartiennent aux substances organiques. Il a été signalé pour la première fois par M. Pasteur, dans les deux modifications de l'acide tartrique, qu'il a obtenues par le dédoublement de l'acide appelé racémique.

TROISIÈME DIVISION.

Groupements réguliers d'individus appartenant à des espèces différentes.

Ce n'est pas seulement dans les cristaux de même nature et de même forme que l'on observe une tendance à se grouper d'une manière régulière; ces deux conditions de l'identité dans la forme et dans la composition chimique ne sont pas tellement absolues, qu'il ne puisse y avoir quelque régularité dans le groupement, quelque rapport constant dans les positions relatives de deux ou de plusieurs cristaux, de forme et de structure différentes, surtout s'il y a dans ces cristaux, à défaut d'identité, au moins une certaine analogie dans la forme et dans la composition; s'ils offrent dans leurs angles un certain degré de rapprochement, et appartiennent à cette catégorie de cristaux que nous caractériserons plus loin, et qu'on nomme *plésiomorphes*.

La staurotide, qui cristallise en prisme droit à base rhombe, et le disthène, qui cristallise en prisme oblique à base parallélogrammique, se montrent souvent, dans les roches du Saint-Gothard, groupés selon leur longueur, de manière que les axes de leurs prismes soient parallèles, et que, de plus, la face M de clivage du disthène corresponde à la face o (ou g^1) de la staurotide, laquelle est la troncature de l'arête aiguë du prisme fondamental. Ces minéraux sont tous deux des silicates simples d'alumine. On trouve aussi au Saint-Gothard des cristaux de fer oligiste, du système rhomboédrique, en tables hexagonales, sur les bases desquelles se voient de petits cristaux de rutile ou de titane oxydé rouge, en prismes droits à base carrée, terminés par des sommets à quatre faces. Ces petits cristaux sont disposés par faisceaux parallèles, perpendiculairement aux bords des hexagones, et par conséquent les axes de ceux qui ont des directions différentes font entre eux des angles de 60 et de 120°; de plus, le plan de jonction est parallèle à l'une des faces les plus ordinaires des cristaux de rutile, celle qui correspond au clivage le plus facile.

Les deux pyrites de fer, dont l'une est cubique, et l'autre pris-

tique, ont été trouvées à Littmitz en Bohême, groupées en-
nble, de manière que l'une des faces du cube soit parallèle à
section passant par la petite diagonale du prisme.

A Baveno, sur le lac Majeur, on voit sur de gros cristaux d'or-
ose rouge de chair, de petits cristaux blancs d'albite, qui
it avec les premiers en position presque parallèle.

L'amphibole et le pyroxène, qui cristallisent en prismes obli-
es à base rhombe, et dont les formes et les compositions ont
: tels rapports, qu'on a souvent cherché à identifier les deux
pèces, se groupent souvent par couches prismatiques, ou par
nes planes superposées, de manière que leurs axes principaux
ient parallèles, en même temps que les sections diagonales.
est ce que l'on voit dans les porphyres pyroxéniques des monts
urals, où des cristaux ayant la forme du pyroxène présentent
térieurement un noyau de la même substance, avec une
orce ou enveloppe prismatique d'amphibole, qui se reconnaît
sément par ses clivages. Ces cristaux mixtes, par la diminu-
on graduelle du noyau pyroxénique, passent insensiblement à
substance appelée *ouralite*, dont la forme extérieure est encore
lle du pyroxène, tandis qu'elle présente à l'intérieur, dans
ntes ses parties, la composition qui appartient en propre à
mphibole. Dans la serpentine de la Baste, au Harz, on voit
: même des cristaux de pyroxène diallage, ayant une écorce
amphibole hornblende. La même chose s'observe dans l'eu-
ıotide de la Valteline, où l'on a pris la hornblende pour de
ıypersthène, espèce particulière de pyroxène; dans les hypérites
ı hypersthénites du Tyrol et de la Saxe, où un véritable noyau
hypersthène est recouvert d'une écorce amphibolique. La sma-
gdite des euphotides est aussi un composé de lames pyroxéni-
ıes, parallèles à l'axe principal et à la diagonale horizontale,
alternant avec des lamelles amphiboliques, qui, tantôt, ont
ne position cristallographique semblable, et tantôt, au con-
aire, se groupent par une de leurs faces prismatiques M avec la
ction des premières, qui correspond à la diagonale horizon-
le de leur prisme.

CHAPITRE VI.

DES IMPERFECTIONS DES CRISTAUX.

Jusqu'à présent, nous avons toujours supposé dans les cristaux qui faisaient l'objet de nos études, cette régularité et cette symétrie qu'ils ont en effet, tant qu'ils sont dans leur état normal, et que représentent toujours les figures ou les modèles dont on se sert dans les démonstrations relatives aux faits et aux théories qui les concernent. Mais des influences locales, des causes perturbatrices de divers genres, qui agissent pendant la période d'accroissement du cristal, s'opposent à ce qu'il en soit toujours ainsi ; elles déforment le cristal, en rendant inégales des faces et des arêtes, qui devraient être égales ; elles altèrent ces faces, en empêchant qu'elles soient parfaitement lisses et continues. Ce sont ces diverses sortes d'accidents ou d'imperfections que les cristaux peuvent nous offrir, soit dans l'aspect général de leur forme, soit dans les conditions physiques de leurs faces, que nous allons étudier en ce moment. Nous considérerons en premier lieu les altérations de la forme, et nous traiterons ensuite des modifications que peuvent subir les faces.

§ 1. *Déformations des cristaux par accroissement inégal.*

Remarquons d'abord qu'un cristal composé, une combinaison comme celle du cube et de l'octaèdre, peut, sans cesser d'être régulier, subir des changements notables dans son aspect, par le seul fait de la variation de distance, par rapport au centre, des faces d'une même sorte, soit les faces cubiques, soit les faces octaédriques. Si les deux espèces de faces sont à peu près à la même distance, elles seront pour ainsi dire en équilibre, sous le rapport de leur étendue relative, et l'on aura le cubo-octaèdre dit *symétrique* (fig. 35, pl. II), dans lequel les faces du cube sont des carrés égaux, et les faces de l'octaèdre des triangles équilatéraux. Mais si les faces de l'octaèdre sont plus éloignées, c'est-à-dire si elles ont pris relativement moins d'accroissement, le cubo-octaèdre ressemblera à un cube légèrement tronqué sur ses angles (fig. 34); les faces de l'octaèdre seront de

petits triangles, et les faces du cube auront la forme d'octogones symétriques. Si ce sont, au contraire, les faces de l'octaèdre qui prédominent, elles présenteront la forme d'un hexagone symétrique, tandis que les faces du cube reprendront la forme quadrangulaire (fig. 36). Dans tous les cas de ce genre, il y a conservation de la symétrie, et simplement changement de figure.

Mais si, par suite d'un accroissement inégal, non uniforme, plus rapide pour certains côtés que pour d'autres, accroissement du genre de celui dont nous avons déjà eu occasion de parler, pages 45 et 46, les faces d'un même ordre viennent à varier entre elles de distance et d'étendue relative, à combien plus forte raison l'aspect de la combinaison éprouvera-t-il de modifications, qui, dans ce cas, seront toutes irrégulières? Il résultera d'une pareille cause, des déformations sans nombre, dont il faut que le minéralogiste soit prévenu, pour se tenir en garde contre les erreurs qu'elles peuvent occasionner; car il arrive souvent que la première vue d'un cristal lui donne l'idée d'une forme et d'une symétrie tout autres que celles qui conviennent à son système cristallin. Mais, lorsqu'on s'est rendu compte de pareils défauts de forme, on peut toujours les reconnaître dans la pratique, les corriger par la pensée, et rétablir les choses dans leur état normal.

Ces déformations des cristaux proviennent : 1° de l'étendue inégale que présentent fréquemment les faces de même ordre, certaines d'entre elles ayant pris un accroissement démesuré aux dépens des autres; 2° de la disparition complète d'une ou plusieurs de ces faces, ce qui est la conséquence de ce que nous venons de dire : car si certaines faces peuvent empiéter sur d'autres, au point de réduire celles-ci à un état rudimentaire, elles peuvent par cela même les faire évanouir complètement; 3° enfin, de ce qu'un cristal est souvent resté incomplet, a été réduit à une portion de son contour latéral, quelquefois même à un seul de ses sommets, par suite de son implantation sur les parois de la cavité ou du vase où il s'est formé, ou bien par suite de son groupement avec d'autres cristaux de la même espèce.

Nous nous bornerons à citer ici deux seuls exemples de ces cas. Le premier sera fourni par les cristaux ordinaires de l'alun, qui affectent la forme de l'octaèdre régulier (fig. 41, pl. XIII). Quand ces cristaux se développent plus dans une direction horizontale que dans le sens de leurs deux autres dimensions, ils prennent la forme d'un octaèdre allongé (fig. 42), qu'on appelle

octaèdre *cunéiforme*, parce que deux de ses pointements sont remplacés par des coins. Quelquefois l'accroissement du cristal a été très-faible dans le sens perpendiculaire à deux faces octaédriques, et plus rapide dans les autres sens, et le cristal offre l'un des aspects que l'on voit fig. 43 et 44; il ressemble à une tranche de l'octaèdre. Le quarz-hyalin, quand il est cristallisé régulièrement, présente la forme symétrique que l'on voit fig. 45: c'est celle d'un prisme hexagonal régulier, terminé par des pyramides à triangles isoscèles. Mais, par suite d'un accroissement irrégulier, il semble quelquefois s'être allongé dans le sens de l'un de ses axes secondaires, et devient cunéiforme, ou paraît avoir été comprimé d'avant en arrière, comme l'indique la figure 46. Dans d'autres cas, cette apparence d'allongement se manifeste dans une direction oblique à l'axe, et l'on a l'aspect trompeur, ou la variété de forme nommée par Haüy *sphalloïde*, que représente la figure 47. Le quarz est une des espèces dans lesquelles ces sortes de déformations sont les plus habituelles; elles sont si nombreuses, qu'un ancien auteur, Scopoli, s'est plu à les décrire, et en a fait le sujet d'un ouvrage spécial fort étendu.

§ 2. *Stries des faces cristallines.*

Passons maintenant à l'examen des imperfections, ou plutôt des modifications dans la texture et dans l'aspect des faces cristallines. Il y a beaucoup de cristaux dans lesquels les faces se présentent à l'œil comme des plans parfaitement lisses et continus, et, à cause de cela, on a fait de cette condition l'état normal ou l'état de perfection des cristaux. Cependant, il en est un grand nombre dont la forme générale est d'ailleurs régulière, mais dont les faces, examinées de près, laissent voir des interruptions, des inégalités en creux ou en relief, et même des courbures. Tous ces accidents des faces cristallines ont été pris pour des imperfections. Toutefois, parmi ces accidents, il en est un beaucoup plus général qu'on ne le croit communément, et qui mérite une attention particulière; car, il est bien moins une irrégularité dans les cristaux qu'une nouvelle manifestation de leur structure intérieure et des lois mêmes de la cristallisation. Nous voulons parler du phénomène des *stries*, qui, étant toujours d'accord avec la symétrie du cristal (non pas seulement sa symétrie apparente et purement géométrique, mais bien cette symétrie réelle que nous avons définie précédemment), facilite les moyens de la re-

connaître, en rendant sensibles des différences entre les faces, les arêtes, les diagonales et les angles solides, que la forme géométrique seule ne peut accuser.

Ce phénomène consiste dans une sorte de rayure naturelle que nous offrent les faces de beaucoup de cristaux, et pareille à celle que l'on voit habituellement sur les pans des prismes du cristal de roche; ces faces semblent avoir été rayées et comme burinées à l'aide d'une pointe dure. Ce phénomène est très-ordinaire; car, beaucoup de faces, qui à la vue simple paraissent lisses, laissent apercevoir des stries fines quand on les examine avec le secours d'une loupe ou d'un microscope. Loin donc d'être un cas exceptionnel, c'est peut-être l'état le plus commun des faces cristallines, et sans doute, ces figures, telles que celles qu'on voit pl. XV, sous les numéros 23, 27 et 30, ou plutôt les modèles en bois qu'elles représentent, et dont Haüy a fait un si bon usage pour peindre aux yeux ce que sa théorie de la structure indiquait à l'esprit; ces figures, où les faces apparentes résultent du nivellement d'une foule d'arêtes ou de pointes de molécules, ne nous représentent pas seulement un genre de texture moléculaire, qui échappe à nos yeux par l'extrême petitesse de ses éléments, elles nous représentent aussi une structure, qui peut devenir sensible et parfaitement observable.

On a considéré les surfaces striées comme le résultat d'une combinaison alternative ou oscillatoire de certaines faces cristallines, existantes déjà ou du moins possibles sur le cristal, qui offre ce genre d'accident. Jusqu'ici, nous avons toujours admis que, quand deux formes simples entraient en combinaison l'une avec l'autre, les faces de l'une s'interposaient tout d'une pièce entre les faces de l'autre. Mais quand on examine de près les stries horizontales, qui couvrent les pans du quarz prismo-pyramidé, fig. 45, on voit que ces stries sont déterminées par des crêtes ou saillies cunéiformes, formées chacune de petites bandes planes, fort étroites et alternativement inclinées en sens contraires; de plus, on remarque que ces éléments plans sont alternativement parallèles aux faces P et *z*, qui terminent le pan *r* que l'on considère. On a vu là un nouveau mode de combinaison par alternance des deux faces P et *z*, dans la région occupée par le pan *r*, comme si les forces qui tendent à produire les deux faces P et *z*, avaient agi périodiquement et d'une manière intermittente, ou bien avaient eu alternativement l'avantage l'une sur l'autre, jusqu'à ce qu'enfin une des deux l'eût emporté sur

la seconde d'une manière définitive. Mais, sans recourir à ce mode d'explication, on peut faire rentrer ce phénomène dans la classe des faits connus et admis de tout le monde, en ne voyant dans le plus grand nombre des cristaux à faces striées, que le résultat d'un groupement *direct* (voyez p. 191) d'une foule de petits cristaux de même forme et de mêmes dimensions, apposés parallèlement les uns aux autres, comme c'est le cas de ces modèles composés dont nous parlions tout-à-l'heure, et que Haüy a imaginés pour les développements de sa théorie. Tous ces petits cristaux pourraient se fondre à l'intérieur en une masse continue, et ne seraient distincts et séparés qu'à la surface ; ce serait quelque chose d'analogue à ces aggrégations d'individus qu'on voit dans le dernier embranchement du règne animal, individus qui se perdent intérieurement et dans une masse commune, tandis qu'à la surface les individus sont libres et distincts par leur côté extérieur. Nous allons voir que des raies ou fissures parallèles peuvent avoir encore d'autres causes que celles que nous venons d'indiquer; nous appellerons *stries de groupement*, celles dont il vient d'être question, parce que nous les rapporterons à la dernière des causes que nous avons signalées et qui nous paraît la plus naturelle ; mais, quelle que soit l'origine de ce genre d'accident, il y a là un fait général d'une grande importance, c'est que toute direction de strie est parallèle à une arête ou à l'intersection de deux faces cristallines, et qu'elle est susceptible d'une détermination cristallographique rigoureuse, circonstance qui assigne une grande valeur à l'observation de ce caractère.

Si l'on place une face striée par groupement dans une position oblique, elle nous apparaîtra alors comme une sorte de gradin montant ou d'escalier, ainsi qu'on le voit dans la fig. 23, pl. XV. Les petits plans élémentaires, dont se composent les crêtes cunéiformes, forment la largeur et la hauteur des marches de cet escalier; et, à cause de l'uniformité de ces marches, la surface qui touche tous leurs bords saillants est plane. Ce plan résultant correspond presque toujours à une des lois de modification les plus simples et les plus ordinaires. Cependant, dans quelques cas, comme dans le quarz dit *fusiforme*, on observe des faces striées obliques à l'axe, et qui ne peuvent répondre qu'à des modifications tout-à-fait extraordinaires.

Si les marches du gradin, au lieu d'être uniformes, variaient progressivement, soit en largeur, soit en hauteur, la surface tangente ne serait plus plane, ce serait une surface courbe, du

genre de celles que les géomètres appellent des surfaces développables. Il en résulterait pour le cristal une courbure superficielle et simple, dans le sens perpendiculaire à la direction des stries. C'est là sans doute une des causes les plus ordinaires des arrondissements que l'on observe dans les cristaux, dont la structure interne est d'ailleurs parfaitement régulière.

Outre les stries de groupement, qui consistent dans une succession de saillies et de rentrées cunéiformes, on doit encore admettre deux autres sortes de stries, dont les unes sont des *stries d'accroissement*, dues à la formation successive du cristal par lames ou couches polyédriques parallèles, qui se distinguent nettement à la surface du cristal ou dans sa cassure, non-seulement par la couleur différente des zones, mais encore par les fissures qui les séparent; les autres sont des *stries de clivage*, et sont produites de même par les fissures infiniment étroites et profondes qui séparent les couches que le clivage peut mettre successivement à découvert.

Les stries des cristaux peuvent différer beaucoup en intensité, et, sous ce rapport, on distingue les stries fines et les cannelures plus ou moins grossières et profondes.

Sur une même face, la rayure peut être simple ou multiple. Elle est simple, quand on n'observe qu'un seul système de lignes parallèles ; elle est multiple, quand il y a sur la même face plusieurs directions différentes, et par conséquent plusieurs systèmes de stries, qui sont ou juxta-posés, ou entrecroisés.

Dans le cas d'un seul système de stries, on doit donner beaucoup d'attention à leur direction particulière, qui peut être très-variable dans des formes de même genre, appartenant à un même système de cristallisation. Dans les cristaux prismatiques et sur les pans des prismes, les stries peuvent être verticales ou disposées en long, comme on le voit dans les cristaux de béril aigue-marine, de tourmaline et de topaze; elles peuvent être horizontales, ou en travers, comme dans les prismes de quarz, de céruse et de polybasite; elles peuvent se présenter obliquement, comme dans les prismes de calcaire spathique et de miargyrite. Dans les rhomboèdres, les faces peuvent être striées parallèlement à l'une ou à l'autre des diagonales; dans les dodécaèdres ou trapézoèdres du système cubique, les stries sont parallèles à la petite diagonale ou à la grande des rhombes ou des trapézoïdes, etc.

Dans le cas des stries multiples, les systèmes de stries peuvent être non croisés et simplement juxta-posés. Dans les rhomboèdres

de l'argent rouge et de la chabasie, deux systèmes, séparés par une ligne de suture, présentent la disposition penniforme qu'on voit fig. 48, pl. XIV, et laissent entre eux un petit champ libre de forme rhombe; sur les faces octaédriques de la pyrite, trois systèmes prennent naissance sur les angles et se continuent jusqu'à leur rencontre mutuelle, mais sans se pénétrer et en laisant vide un espace triangulaire, fig. 49; sur les pans des prismes de l'harmotone, quatre systèmes pareils entourent un espace parfaitement lisse, ayant la figure d'un rhombe, fig. 50.

Les systèmes de stries sur la même face peuvent se croiser et former des assemblages de lignes réticulées ou tricotées, comme on le voit sur les bases de certains cristaux à clivage rhomboédrique, comme les cristaux de calcaire spathique, de corindon et de fer oligiste (fig. 51), où les stries se croisent sous des angles de 60°.

Les stries n'ont d'autre inconvénient que de nuire à la mesure des angles ou à celle de la dureté du minéral : ces inconvénients sont bien rachetés par de précieux avantages. Les stries se répètent toujours de la même manière dans toutes les directions qui ont la même valeur cristallographique; en ne se répétant pas dans celles qui, au point de vue géométrique, seraient équivalentes, elles annoncent et caractérisent un mode particulier d'hémiédrie : par exemple, les stries en diagonale des cubes de la blende annoncent l'existence du tétraèdre dans ce minéral, comme celles des cubes de la pyrite annoncent l'existence du dodécaèdre pentagonal. Voyez pages 118 et 123. Les stries peuvent encore servir utilement à orienter les combinaisons : elles marquent les lignes de séparation des individus dans les cristaux qui se pénètrent et sont contenus sous une enveloppe unique, comme cela a lieu pour certains cristaux de quarz et de pyrite.

Il y a une autre sorte d'accident que les faces peuvent offrir, et qui se rattache au phénomène des stries : c'est ce qu'on peut appeler le *pointillage* des faces. Il a lieu dans les faces qui présentent, non une suite d'arêtes fines et très-serrées, mais un assemblage de petites pointes, qui sont autant d'angles solides formés par la réunion de trois ou d'un plus grand nombre de facettes planes. Dans ce cas, la texture des faces, au lieu de ressembler à celle que nous représente la figure 23, pl. XV, citée plus haut, est analogue à celle que représente la figure 30 de la même planche, et il est évident qu'on peut l'expliquer par un groupement direct de petits cristaux, qui viennent tous se niveler

à la surface par un de leurs angles solides. Les faces, dans ce cas, paraissent comme chagrinées : telles sont celles qui forment les bases des prismes d'émeraude verte, provenant des mines de la Colombie.

§ 3. *Courbure des faces. — Cristaux à faces creuses.*

Un autre genre d'imperfection que les cristaux peuvent nous offrir, consiste dans les diverses sortes de courbure qu'on observe parfois dans leurs faces. Déjà nous avons signalé cette courbure superficielle, qui résulte de la cause même qui produit les stries, lorsque les petites bandes planes qui les composent, varient progressivement de largeur. Les cristaux de diamant, de gypse et de calcaire fournissent de nombreux exemples de ce genre d'accident.

Mais il y a aussi des courbures profondes, qui s'étendent dans toute la masse cristalline, parce qu'elles consistent dans une incurvation générale des lignes du réseau et des couches du cristal. Cette courbure est tantôt convexe, tantôt concave, quelquefois elle est à double courbure. Les cristaux de calcaire, surtout lorsqu'ils sont mélangés de carbonates isomorphes, les cristaux de pyrite arsénicale, nous offrent de beaux exemples de ce dernier cas : il y a des pyrites qui sont contournées en forme de S ; des spaths perlés, qui le sont en forme de selle ; il y a des prismes de quarz, qui sont tordus ou courbés en arc.

Dans d'autres cas, la courbure n'atteint pas les couches internes : elle n'est que superficielle, comme dans le cas que nous avons considéré tout d'abord ; mais elle provient de causes extérieures, tout-à-fait étrangères à la cristallisation, de causes physiques ou chimiques, qui semblent avoir opéré un commencement de fusion ou de dissolution du cristal, ou de causes mécaniques qui en ont usé la surface. Telles sont les courbures que l'on observe dans certains cristaux granuliformes, comme ceux de chondrodite, de grenat colophonite, de pyroxène coccolithe, de hornblende des volcans, d'amphibole pargasite, d'apatite moroxite, etc.

Enfin, il est des cristaux dont les faces sont comme creusées de cavités, tantôt irrégulières, et tantôt régulières en forme d'entonnoirs ou de trémies. La forme du cristal n'est remplie que d'une manière incomplète par la substance, dont les molécules se sont concentrées vers les plans passant par le centre et par ces arêtes. Elles ont produit ainsi des cloisons, d'où résulte une

sorte de carcasse ou de cristal à jour. Lorsqu'on examine avec soin les parois de ces cloisons matérielles, on remarque souvent qu'elles sont en forme de gradin descendant, phénomène analogue à celui que nous ont offert les stries superficielles. C'est le cas des trémies de sel marin, des cristaux rhomboédriques du bismuth et de l'antimoine. Les octaèdres réguliers de l'alun et de l'oxyde rouge de cuivre, les pyramides du quarz hyalin, nous offrent de beaux exemples de ces cristaux évidés, et presque réduits à leurs arêtes, qui sont alors très-régulièrement formées.

CHAPITRE VII.

DE LA STRUCTURE CRISTALLINE.

La *structure* est le caractère qui résulte de la disposition des parties composantes dans l'intérieur de la masse minérale. Ce mot peut s'entendre de deux manières différentes, selon l'espèce des particules que l'on considère comme constituant la masse par une aggrégation immédiate. Si la structure qu'on envisage est déterminée directement par l'aggrégation des molécules propres de la substance, sans qu'il y ait lieu par conséquent d'admettre entre ces molécules et la masse totale résultante, aucun groupement intermédiaire, la structure est alors *simple* ou *moléculaire* : telle est celle du cristal de roche, de l'obsidienne, du verre artificiel, et d'un grand nombre de masses homogènes, où l'œil ne discerne aucune partie, aucune surface de séparation.

La structure est *composée*, lorsqu'elle a pour éléments immédiats, des particules visibles, comme des fibres, des lamelles ou des grains, particules qui, considérées ensuite en elles-mêmes, offrent chacune une structure de la première espèce. Cette seconde sorte de structure a reçu le nom particulier de *texture*. Les masses qui la possèdent, offrent donc une double structure, savoir : une structure simple ou moléculaire dans chacune des parties distinctes qui les composent, et une structure d'aggrégation dans l'ensemble de ces mêmes parties.

Les structures simples et composées se distinguent ensuite en structures *régulières*, et structures *irrégulières*, selon que le mode d'aggrégation des molécules du corps ou des éléments secon-

daires de la masse est lui-même régulier ou irrégulier. Nous nous occuperons d'abord exclusivement de la structure *simple et régulière*, que l'on appelle aussi *structure cristalline*, parce qu'elle appartient à tous les cristaux, dont la formation et l'accroissement ont eu lieu d'une manière uniforme et continue.

§ 1. *Structure simple et régulière. — Clivage des cristaux.*

Pour faciliter l'intelligence des faits nombreux et importants qui se rapportent à cette considération, nous commencerons par rappeler ici une idée théorique, que nous avons déjà mise en avant dans une autre circonstance, et qui est tellement liée aux faits dont il s'agit, que cette idée étant une fois admise, tous les faits en découlent d'eux-mêmes, tandis que si l'on suppose ceux-ci donnés par l'observation, la notion théorique s'en déduit à son tour d'une manière si naturelle, qu'elle peut être considérée alors comme prouvée par eux *a posteriori*. L'idée dont nous parlons, c'est que tout cristal simple est un assortiment symétrique de molécules, espacées d'une manière uniforme et régulière, et offrant dans leur ensemble ce genre particulier de disposition, qu'on appelle un arrangement en quinconce ou en échiquier; d'où il suit que la masse du cristal doit présenter en divers sens des séries parallèles de couches planes ou de lames, composées chacune de files parallèles de molécules. La figure 1, pl. I, représente une pareille lame ou couche de molécules dans un cristal du système cubique; la figure 2 représente une lame cristalline, prise dans un cristal du système rhombique. Admettons cette idée provisoirement, et il en résultera des conséquences qui pourront se traduire en caractères sensibles, et seront par conséquent susceptibles de vérification par l'observation directe.

Une de ces conséquences, qui s'offre d'elle-même, c'est qu'il existe dans tout cristal des systèmes de fissures planes, parallèles, qui se croisent dans une multitude de sens, et dont chacune sépare deux lames voisines. Les lames cristallines ne sont donc point en contact immédiat : cependant, elles n'en sont pas moins retenues fixement à distance, par une attraction de cohésion. Cette force de cohésion doit être la même pour toutes les lames qui ont la même direction; mais si l'on passe d'une série de lames à une autre série, de direction différente, l'intensité de la cohésion varie en général.

Il y a donc des *minima* de cohésion; il y a des directions dans lesquelles les lames adhèrent entre elles avec moins de force que dans toute autre. Cela posé, si la cohésion est inégale dans les divers sens, et s'il existe des directions de moindre cohérence, qu'arrivera-t-il, si par un effort mécanique (tel par exemple que la pression d'une lame de couteau, dirigée parallèlement au joint de deux lames), on essaie de vaincre la résistance qu'elles opposent à leur séparation? C'est que si l'on tombe par hasard sur une de ces directions de moindre cohérence, la résistance pourra se trouver assez faible pour être surmontée par la puissance qu'on aura employée, et les lames se sépareront par leurs propres joints: il y aura *clivage*, c'est-à-dire cassure (1) ou division naturelle du cristal, suivant des faces planes, lisses et éclatantes. Ce phénomène remarquable s'observe en effet, sinon dans tous, du moins dans le plus grand nombre des cristaux de la nature.

Pourquoi ne l'observe-t-on pas dans tous les cristaux, et pourquoi dans ceux où il a lieu ne peut-on le réaliser que pour un petit nombre de directions? Cela ressort évidemment de l'explication même que nous venons de donner; et il en résulte encore ceci: c'est que s'il nous était possible d'augmenter indéfiniment la puissance avec laquelle nous cherchons à vaincre l'adhérence des lames cristallines, le clivage aurait lieu dans tous les sens où il y a des fissures. Or, si nous ne pouvons réaliser cet accroissement indéfini de la puissance, nous pouvons au moins l'imaginer par la pensée, et, de cette manière, nous sommes conduits à admettre que dans tout cristal, outre un petit nombre de clivages réels, il existe une infinité de clivages intellectuellement possibles.

Mais laissons de côté, pour le moment, la cause du phénomène que nous venons d'indiquer, et sur laquelle nous aurons bientôt occasion de revenir; et considérons le clivage en lui-même, comme un fait donné par l'observation. Voyons d'abord par quels moyens on peut l'opérer.

D'après ce qui a été dit précédemment, le clivage doit être plus ou moins facile, selon la nature des substances. Dans les minéraux où la cohésion est faible, on peut se servir pour les cliver, d'un instrument tranchant, d'une simple lame de couteau, que l'on place dans la direction présumée d'un joint naturel,

(1) Le mot *clivage* vient du mot allemand *klieben*, qui veut dire *fendre*, ou *fendre*.

en ayant soin d'appuyer ou de frapper avec un marteau sur le dos de la lame; on parvient souvent ainsi à vaincre l'adhérence des lames cristallines, et elles se séparent en mettant à découvert les faces par lesquelles elles se regardaient, et qui se montrent quelquefois plus nettes et plus brillantes que les faces naturelles. C'est ainsi qu'on divise très-facilement dans un certain sens les micas, le talc, le gypse, lorsque ces minéraux se présentent en cristaux ou en masses cristallines. Lorsqu'on est obligé d'employer le marteau, il est bon de fixer le cristal à cliver sur une enclume ou entre les mâchoires d'un étau. Il peut arriver que les joints ne s'obtiennent que d'une manière interrompue, par petites lames placées sur des plans différents, et que ces indices de clivage soient peu sensibles, à raison de leur discontinuité même ou de leur faible éclat. Dans ce cas, il faut, pour les apercevoir plus facilement, avoir recours à un moyen dont se servait fréquemment Haüy, et dont il a tiré le parti le plus avantageux : c'est de les observer le soir à une vive lumière; on les reconnaît alors à la coïncidence des reflets qui se montrent à la fois sur toutes les petites portions de lames parallèles, dont se compose la surface de cassure.

Des indices de joints peuvent encore être développés : 1° par un simple choc, qui, en ébranlant ou en étonnant le minéral, y détermine quelquefois de légères fissures, que l'on reconnaît à des reflets intérieurs ou à des stries superficielles, dont le parallélisme est facile à saisir; 2° par une sorte de trempe que l'on fait subir au minéral, après l'avoir fortement chauffé, en le plongeant brusquement dans de l'eau froide. Parmi les minéraux qui, à raison de la grande cohésion de leurs particules, ne peuvent être clivés que très-difficilement, il en est quelques-uns dans lesquels on peut ainsi provoquer la séparation des feuillets, ou du moins faire naître des fissures parallèles et entrecroisées, dont les directions marquent celles des clivages que l'on cherche. C'est ce qui a lieu pour le quarz-hyalin, ou cristal de roche, qui se refuse au clivage proprement dit, et ne présente le plus souvent qu'une cassure vitreuse dans les fragments qu'on en détache par le choc.

Quand un cristal a été clivé une première fois dans une certaine direction, on peut continuer à le subdiviser dans le même sens, parallèlement aux faces que l'on a mises à nu, de manière à obtenir des lames de plus en plus minces; le gypse, le mica peuvent être ainsi séparés en lames d'une ténuité extrême. Le

clivage paraît donc pouvoir se répéter indéfiniment, et s'il y a une limite apparente à cette opération, c'est celle qui résulte de l'imperfection de nos sens et de nos instruments. Cependant, si les cristaux sont composés de molécules disjointes, notre raison est bien forcée d'admettre une limite réelle, en deçà de laquelle s'arrêtent toutes les observations; car, il est clair que les lames cristallines ne peuvent pas avoir une épaisseur moindre que celle des couches simples de molécules, dont la superposition constitue la masse du cristal.

§ 2. *Lois physiques et cristallographiques des clivages.*

Chaque direction de clivage est parallèle à une face de cristallisation, c'est-à-dire à une face qui existe sur le cristal clivé, ou qui aurait pu s'y produire en vertu d'une des lois simples de modification, d'où proviennent les formes particulières du système cristallin; et l'ensemble des plans donnés par tous les clivages de direction différente, représente toujours une des formes de ce système, soit simple, soit composée. En outre, si l'on rapporte ainsi chacun des clivages à l'une des faces de la forme, qui résulte de leur ensemble, on trouve que des clivages de même valeur physique, des clivages en tout point semblables, d'une égale facilité, d'un éclat et d'une netteté tout-à-fait comparables, se reproduisent parallèlement à toutes celles des faces du solide de comparaison, qui sont identiques entre elles; tandis que ceux des clivages qui correspondent à des faces inégales, et par conséquent non identiques, offrent toujours des différences physiques, plus ou moins prononcées. Ainsi, lorsqu'une substance du système cubique se clive parallèlement aux faces d'un cube ou d'un octaèdre régulier, ou d'une autre forme simple quelconque, comme toutes les faces d'une de ces formes simples sont égales et physiquement identiques, le clivage doit être également net et facile dans toutes les directions. La même chose aurait lieu dans les systèmes rhomboédrique et quadratique, si les clivages étaient parallèles aux faces d'un rhomboèdre ou d'un octaèdre à base carrée. Mais si la division mécanique se faisait parallèlement aux faces d'une combinaison binaire, comme d'un prisme droit à base hexagonale, d'un prisme droit à base carrée ou à base rhombe, dans ce cas, les clivages correspondants aux pans de l'une de ces formes seraient identiques entre eux; mais ceux qui répondraient aux bases offriraient en général des caractères

physiques différents, quand on viendrait à les comparer avec les premiers. Il en serait de même, dans les formes prismatiques, des clivages qui les subdiviseraient diagonalement, relativement à ceux qui seraient parallèles aux faces extérieures.

Le nombre des clivages possibles est variable dans les différentes espèces. Il est des substances qui ne peuvent être clivées nettement que dans un seul sens, comme les micas, le gypse. Il en est d'autres qui sont susceptibles d'être clivées dans deux directions seulement, ou dans trois directions, parallèles à un même axe; ce qui se voit fréquemment dans les espèces des systèmes prismatiques, notamment de ceux qui ont un axe principal de symétrie, mais ce qui n'a jamais lieu dans les systèmes cubiques. Les premières n'ont qu'une simple structure laminaire; les secondes ont une structure prismatique. Dans les cas de ce genre, le *solide de clivage*, celui qui résulte de la combinaison de tous les clivages possibles, est une forme ouverte ou indéfinie.

Enfin, il arrive souvent que le nombre total des clivages est tel, que les solides qu'on détache du cristal sont terminés de toutes parts par des plans. Il suffit pour cela qu'il y ait trois clivages au moins, qui soient tous inclinés entre eux et non parallèles à une même droite, comme dans le cas précédent. Le solide de clivage est alors une forme complète ou fermée. Ce solide de clivage est invariablement le même dans tous les cristaux d'une même espèce minérale; par conséquent, dans tous ces cristaux, quelle que soit la différence de leurs formes extérieures, les clivages se présentent toujours en même nombre, et inclinés entre eux de la même manière, pourvu que toutes autres conditions soient égales, c'est-à-dire pourvu que tous les cristaux soient également purs. Ainsi, tous les cristaux de calcaire spathique se divisent toujours en fragments rhomboïdaux d'une figure constante, dont les angles dièdres sont de 105°5', et de 74°55'; tous les cristaux de galène se divisent en fragments cubiques, etc. Ce résultat nous montre de quelle importance est la considération de la structure manifestée par le clivage, pour la distinction des espèces minérales. Cette structure est comme une sorte d'organisation, qui est constante dans chaque espèce, et qui varie d'une espèce à l'autre, par des différences susceptibles d'être déterminées avec une exactitude rigoureuse.

Il y a cependant quelques exceptions apparentes à ce résultat général d'observation. Ainsi, il arrive quelquefois que dans certaines variétés d'une espèce minérale on rencontre des clivages

surnuméraires que l'on n'observe pas dans d'autres variétés : ces clivages ne se montrent jamais qu'accidentellement, et le plus souvent en conséquence d'un changement survenu dans la composition normale du cristal, soit par mélanges mécaniques, soit par mélanges chimiques ou substitutions isomorphes. Le calcaire spathique ou spath d'Islande offre quelquefois des joints naturels très-nets dans la direction des plans qui passent par les diagonales horizontales des faces opposées. Sous l'influence de la cause indiquée précédemment, le clivage peut se faire tantôt parallèlement aux faces d'une certaine forme du système, et tantôt parallèlement aux faces d'une autre forme du même système. Dans le corindon adamantin, le clivage est rhomboédrique; il est basique ou perpendiculaire à l'axe des cristaux, dans les corindons télésies (rubis et saphir d'Orient).

Le nombre et la valeur physique des clivages peuvent être d'un grand secours pour déterminer le véritable caractère de certaines formes appartenant à des systèmes divers, mais qui, d'après la seule mesure de leurs angles, pourraient être aisément confondues. Que l'on rencontre, par exemple, dans une espèce, un cristal en parallélipipède rectangle : s'il est seul et dépourvu de modifications symétriques, on n'aura aucun moyen de savoir, à l'aspect de sa forme extérieure, s'il doit être considéré cristallographiquement comme un cube, ou comme un prisme carré, ou bien comme un prisme rectangulaire. Mais si l'on étudie ses clivages, la question, dans beaucoup de cas, ne restera pas longtemps indécise. S'il y a trois clivages, et que ces clivages soient égaux en netteté, le cristal est un cube. Si deux des trois clivages seulement sont égaux, le solide est un prisme droit à base carrée, et le troisième clivage répond à la base. Si les trois clivages sont inégaux, le solide est un prisme à base rectangle. Dans le cas où le nombre des clivages se réduirait à deux, s'ils sont semblables, la forme est celle d'un prisme carré, aux pans duquel ces clivages correspondent; s'ils sont dissemblables, la forme ne peut être que celle d'un prisme droit rectangulaire. Enfin, si le clivage n'a lieu que dans une seule direction, le cristal pourra se rapporter soit au système rhombique, soit au système quadratique; et, dans ce dernier cas, il sera nécessairement parallèle à la base d'un prisme carré.

§ 3. *Formes de clivage. — Formes primitives ou noyaux.*

L'ensemble des plans donnés par tous les clivages de directions différentes, représente toujours, comme nous l'avons dit plus haut, une des formes du système, finie ou indéfinie, simple ou composée : mais trois cas peuvent se présenter, qu'il faut distinguer avec soin.

1° Le nombre des clivages possibles peut être au juste suffisant pour donner, non-seulement une forme complète, mais encore une des formes simples du système. Dans ce cas, on choisit ordinairement cette forme de clivage pour forme fondamentale : c'est ce que faisait toujours Haüy, qui donnait à ce solide le nom de *forme primitive* ou de *noyau;* il l'appelait forme primitive, parce qu'il le considérait comme le type naturel, dont on devait faire dériver toutes les autres formes du système, qui prenaient relativement à lui le nom de formes secondaires; et souvent il substituait le nom de *noyau* à celui de forme primitive, parce que, comme nous le démontrerons bientôt, il est possible, en divisant avec symétrie chacun des cristaux secondaires, de les réduire tous à la forme du solide de clivage, ou, si l'on veut, d'extraire de chacun ce même solide, qui représente à l'esprit une sorte de noyau central, quand on vient à rétablir autour de lui par la pensée tout ce qu'il a fallu enlever pour le mettre à découvert. La galène a pour noyau un cube; la blende, un dodécaèdre rhomboïdal; la fluorine, un octaèdre régulier; le calcaire spathique, un rhomboèdre obtus de 105°5'; le corindon, un rhomboèdre aigu de 86°6', etc. La considération du noyau est importante : car, non-seulement le système cristallin, le système général de cristallisation, peut être déterminé par cette seule donnée, mais encore la série cristalline, ou le système particulier de formes qui caractérise une espèce minérale.

Il est des substances se rapportant à un même système, qui se distinguent nettement par leurs formes primives, lesquelles peuvent être de différents genres (exemple : galène, blende, fluorine); de même genre, avec des valeurs d'angles différentes (calcaire; corindon); de même genre, et présentant des clivages différents (exemple : albite et périkline). L'albite et la périkline ont pour formes primitives des parallélipipèdes obliquangles irréguliers, dont les trois faces P, M, T, adjacentes à un même

angle solide, sont inégales entre elles. Les deux formes primitives sont très-voisines, sans être rigoureusement égales; elles n'offrent dans leurs angles correspondants que de légères différences, qui ne vont pas à plus de 15 ou 20 minutes (1). Mais le clivage parallèle à T est plus net dans la périkline, que celui qui se fait selon M: et c'est le contraire qui a lieu dans l'albite.

2° Il peut arriver que dans une espèce le nombre des clivages soit plus que suffisant pour donner une forme simple complète, qu'il y ait par conséquent quelques clivages superflus ou en excès. Dans ce cas, la forme primitive se détermine au moyen des clivages les plus nets et les plus faciles, qui prennent le nom de clivages essentiels ou de premier ordre. Les autres clivages, dont les directions coupent obliquement ou en diagonale le solide, que les premiers circonscrivent, sont regardés comme des clivages surnuméraires ou de second ordre. Ainsi, dans la barytine, il y a cinq directions de clivage, dont trois donnent un prisme droit à base rhombe: ce sont ceux que Haüy a considérés comme les clivages essentiels. Les deux autres, ordinairement moins sensibles, sont parallèles aux diagonales des bases, et par conséquent rectangulaires entre eux : combinés avec le clivage basique, ils donneraient un second solide de clivage, le prisme droit rectangulaire, qu'on pourrait adopter comme forme primitive, tout aussi bien que le prisme rhombique, si l'on ne se laissait guider dans le choix à faire entre ces deux formes, par le plus ou moins de netteté des clivages.

3° Enfin, il peut arriver que le nombre des clivages possibles ne soit pas suffisant pour donner un solide fermé de toutes parts, une forme primitive complète; qu'il manque, par exemple, un ou deux clivages essentiels. Dans ce cas, le solide de clivage est une forme ouverte, prismatique ou tabulaire; la forme primitive ne peut plus être déterminée complètement par le clivage, ni par conséquent la série cristalline : mais il peut encore se faire que le système général de cristallisation soit indiqué d'une manière fort nette par ce genre d'observation, en faisant abstraction toutefois de son caractère holoédrique ou hémiédrique. Si, par exemple, un minéral est clivable, avec le même degré de netteté et de facilité, dans trois directions parallèles à une même droite, et se coupant sous des angles de 60° et 120°,

(1) Dans l'albite, l'incidence de P sur M est de 86° 24'; dans la périkline, elle est de 86° 41'. L'incidence de P sur T est de 115° 5' dans la première substance; elle est de 114° 45' dans la seconde.

ou bien dans deux directions seulement et rectangulaires, on conclura de là que sa cristallisation se rapporte au système hexagonal, ou au système quadratique.

Lorsqu'il manque ainsi quelques-uns des clivages essentiels, le nombre et la position de ceux qui subsistent, peuvent servir à distinguer entre eux des minéraux qui se rapportent au même système cristallin, et qui sont très-rapprochés par leurs formes extérieures. Ainsi, l'on distinguera toujours facilement les felspaths orthose et ryakolithe des felspaths albite et périkline, en ce que les premiers n'offrent que deux clivages bien nets, et perpendiculaires l'un à l'autre, tandis qu'il existe toujours dans les seconds trois clivages, dont aucun n'est perpendiculaire sur les autres. L'orthose, l'amphibole et le pyroxène, qui sont au nombre des substances cristallisées le plus abondamment répandues dans la nature, ont chacune pour noyau ou pour forme primitive, un prisme oblique à base rhombe: mais, dans l'amphibole, le clivage parallèle à la base manque entièrement, tandis que ceux qui sont parallèles aux pans sont faciles et d'un vif éclat. Dans le pyroxène, au contraire, c'est le clivage parallèle à la base qui souvent est le plus net et le plus facile. Enfin, dans l'orthose, un clivage parallèle à la base se combine avec un autre clivage, parallèle à l'axe, d'une netteté presque égale, et dirigé diagonalement et perpendiculairement au premier. L'hypersthène est un minéral qui diffère du pyroxène augite, en ce qu'il offre, outre les clivages ordinaires du pyroxène, un clivage surnuméraire, parallèle à l'axe et à la diagonale horizontale des bases, d'un éclat particulier et d'une netteté remarquable. Dans la diallage, autre espèce voisine du groupe pyroxénique, les clivages parallèles aux pans ont disparu, et l'on n'aperçoit plus que des traces de ceux qui sont dirigés en diagonale.

Dans les minéraux, qui ont des formes primitives prismatiques, il arrive quelquefois qu'il n'y a de clivage possible que dans une seule direction, parallèle soit à l'axe, soit à la base (les micas; la topaze; l'euclase); ou bien, il existe un clivage apparent dans un sens, et seulement des indices de clivage dans d'autres directions, en sorte qu'il y a un contraste frappant entre ces derniers clivages et le premier (le gypse). On remarque alors que ce clivage unique ou prédominant est d'une extrême netteté, et ordinairement si facile, que le minéral peut se diviser en lames minces, et se présente même naturellement sous cette forme.

Tel est le cas du gypse, et surtout du mica. La topaze offre aussi un seul clivage très-brillant, perpendiculairement à l'axe de ses cristaux prismatiques, et ce caractère suffit pour le distinguer des autres corps avec lesquels on pourrait la confondre.

§ 4. *Nomenclature des formes de clivage.*

Il est important d'avoir des dénominations particulières, pour désigner clairement les différents cas de clivage, soit complet, soit incomplet, que peuvent offrir les minéraux cristallisés. Nous allons énumérer succinctement celles qui sont en usage parmi les cristallographes. Quand le clivage a lieu parallèlement aux faces d'une forme complète, on le désigne par le nom cristallographique de la forme qui en résulte : ainsi, l'on dit que le clivage est *octaédrique* ou *pyramidal*, quand le solide résultant est un octaèdre ; on dit qu'il est *cubique*, *dodécaédrique*, *rhomboédrique*, etc., lorsqu'il a lieu parallèlement aux faces d'un cube, d'un dodécaèdre, d'un rhomboèdre, etc.

Si une substance n'est clivable que dans une seule direction parallèle à l'axe vertical, on dit que le clivage est *prismatoïde*, ou que cette substance est *monotome*.

Si elle ne se clive que dans une direction transversale et parallèle à la base, on dit qu'elle est *axotome*, ou que le clivage est *basique*.

Se clive-t-elle dans plus d'une direction oblique à l'axe, elle est dite *paratome ;* s'il existe au contraire plus d'un clivage, parallèle à l'axe principal, la substance est *péritome*, ou le clivage *prismatique*.

Dans les systèmes hexagonaux et quadratiques, le clivage prismatique peut avoir lieu de deux manières, et il est nécessaire d'indiquer s'il se rapporte au prisme de première ou de seconde espèce.

Dans le système rhombique, le clivage unique suivant l'axe peut correspondre à la grande ou à la petite diagonale : il est donc oû *macrodiagonal*, ou *brachydiagonal*. S'il existe deux clivages obliques à l'axe, ces deux clivages, par leur combinaison, forment vers chaque extrémité un *dôme* ou coin à arête horizontale : on dit alors que le clivage est *domatique*.

Dans le système klinorhombique, un clivage unique, parallèle à l'axe, peut correspondre à la diagonale horizontale ou à la diagonale oblique : il est donc ou *orthodiagonal*, ou *klinodiagonal*. Si le clivage a lieu dans deux directions, ou dans une seule, obliques à l'axe, il est alors *klinodomatique*, ou *hémidomatique*.

§ 5. *Étude particulière des formes primitives, ou des noyaux.*

Le véritable caractère d'une forme de clivage, ou forme primitive, est de pouvoir être divisée parallèlement à toutes ses faces, de manière à diminuer successivement de volume sans changer de forme. C'est là ce qui la distingue des formes secondaires, qui se clivent toujours obliquement par rapport à leurs faces, et par conséquent sur leurs arêtes ou leurs angles solides, en sorte que le clivage est un moyen physique de réaliser sur elles une de ces espèces de troncatures dont il a été question dans l'étude des systèmes cristallins, savoir celle qui établit le passage ou le retour de chacune des formes secondaires à la forme primitive.

Si la forme primitive est un parallélipipède, sa sous-division par des plans parallèles à ses faces ne pourra donner que des parallélipipèdes semblables à cette forme, ou du moins de même mesure d'angles. Mais il est des formes primitives qui, étant sous-divisées de la même manière, peuvent donner plusieurs sortes de solides de clivage, de solides fragmentaires, selon que l'on combine entre eux les clivages, en les prenant tous ensemble ou par parties. Ce sont toutes celles qui ont des faces dans plus de trois directions différentes, et qui admettent par conséquent plus de trois clivages; tels sont: les octaèdres, les prismes hexaèdres réguliers, les dodécaèdres rhomboïdaux. Entrons à cet égard dans quelques détails.

Prenons d'abord pour exemple le prisme hexagonal régulier, et, pour plus de simplicité, supposons que les clivages parallèles aux pans passent par les centres des bases; le prisme se trouvera partagé en six prismes partiels, qui seront des prismes triangulaires équilatéraux (fig. 1, pl. XIV), mais ces prismes sont tellement disposés, qu'étant pris deux à deux, ils forment des parallélipipèdes indiqués par ABOF, BCDO, etc., fig. 2, et qui sont des prismes droits de 120° et 60°. Il résulte donc de là qu'on peut retirer à volonté, par le clivage, d'un prisme hexagonal divisible parallèlement à toutes ses faces, trois sortes de solides, savoir: des prismes hexagonaux, semblables à la forme primitive, lorsqu'on n'omet aucun clivage, et qu'on répète chacun d'eux de manière à avoir des faces opposées parallèles; des prismes droits à base rhombe, lorsqu'on omet un des trois clivages latéraux; des prismes droits équilatéraux, lorsque, sans négliger aucune des directions de clivage, on ne répète point les clivages

latéraux, en sorte que chaque pan reste simple et n'a point de pendant dans la partie opposée du cristal. Les deux dernières formes ne sont que des parties aliquotes, des sous-divisions de la première, obtenues à l'aide de sections diagonales.

On remarquera que parmi ces solides fragmentaires, il doit y en avoir nécessairement un qui soit un parallélipipède, puisqu'on peut toujours réduire les clivages effectifs à trois, et que chacun d'eux peut donner deux faces parallèles.

Si au lieu de se borner aux coupes centrales, on multipliait les divisions suivant des directions parallèles aux premières, comme aussi suivant d'autres parallèles aux bases, on aurait pour résultat un assemblage de prismes triangulaires équilatéraux, ainsi qu'on peut en juger par l'inspection de la figure 3 ; et si l'on réunit deux par deux ces petits prismes équilatéraux, de manière à en former des prismes rhomboïdaux, comme le montre la figure 4, il est clair que le prisme hexagonal primitif pourra être conçu de même comme un assemblage de pareils prismes, comme composé de petits parallélipipèdes, formant des rangées rectilignes, parallèlement aux arêtes de la forme primitive. Cette remarque trouvera bientôt son application dans l'exposé de la théorie de Haüy, relative à la structure des formes secondaires.

Supposons maintenant que l'on veuille sous-diviser par le clivage une forme primitive octaédrique ALMNB, fig. 5, que pour plus de simplicité nous considérerons comme étant l'octaèdre régulier, ce que nous allons dire de cet octaèdre étant également vrai de tous les autres solides du même genre, à quelques différences près dans l'espèce et la désignation particulières des solides obtenus. Concevons qu'on le divise à l'aide de plans, dont chacun passe par le centre, parallèlement aux deux faces opposées. Il est aisé de voir que les plans dont il s'agit passeront en même temps par les milieux des arêtes de l'octaèdre, et détacheront huit tétraèdres réguliers, dont les bases feront partie des faces du noyau, et dont les sommets coïncideront avec le centre *o*. On aura de plus six octaèdres partiels, dans chacun desquels un des angles solides se confondra avec un de ceux de l'octaèdre total, et l'angle solide opposé avec le centre.

Si l'on continuait de sous-diviser le premier octaèdre AB (fig. 5) par des coupes parallèles aux précédentes, et placées entre ces dernières à des distances égales, chaque octaèdre partiel se résoudrait en six nouveaux octaèdres, plus huit tétraèdres ; et chaque tétraèdre en un octaèdre, plus quatre octaèdres, ainsi qu'on

…it fig. 6. Le cristal primitif se trouverait donc transformé en …ssemblage d'octaèdres et de tétraèdres, entremêlés entre eux, …xta-posés par des faces égales, de façon que chaque octaèdre …it entouré de huit tétraèdres, et chaque tétraèdre de quatre …èdres; il est clair qu'en combinant chaque octaèdre avec deux …ement des tétraèdres qui lui sont adjacents, savoir ceux qui …t placés sur des faces opposées, on aurait des parallélipipèdes, …mme le montre la figure 7, et cela dans quatre directions dif…entes, qui répondent aux axes des faces de l'octaèdre. Dans le … de l'octaèdre régulier, ces parallélipipèdes deviennent des …omboèdres aigus, dont l'angle plan au sommet est de 60°.

Les résultats précédents sont susceptibles d'être réalisés à l'aide … clivage, dans la fluorine par exemple, en sorte qu'on peut …traire d'une masse laminaire de cette substance, des octaèdres …guliers, des tétraèdres réguliers et des rhomboèdres aigus, cha…n de ceux-ci pouvant se décomposer à son tour en un octaèdre … deux tétraèdres. De plus, comme les rhomboèdres peuvent …e sous-divisés parallèlement à leurs faces en rhomboèdres …mblables à eux-mêmes, il en résulte que la masse du cristal …ut être conçue comme un assemblage de pareils rhomboèdres …xta-posés par leurs faces.

Supposons enfin qu'il s'agisse de sous-diviser par le clivage un …odécaèdre rhomboïdal, tel que celui de la blende. Soit *lv* (fig. 8) … dodécaèdre. Concevons six clivages qui passent par le centre, … dont chacun soit parallèle à deux faces opposées du dodécaè…re; chaque clivage passera par quatre arêtes et par deux petites …agonales, par exemple, celui qui est parallèle aux deux rhom…es *rsyx* et *zuph*, passera par la diagonale *ot*, par les deux …rêtes *lv*, *va*, par la diagonale *ay*, et les deux arêtes *yl*, *lo*. Or …y a en tout douze petites diagonales et vingt-quatre arêtes dis…nctes; d'où l'on conclura que les six sections passent par toutes …s arêtes et par toutes les diagonales. Donc, il y aura toujours …ois plans, qui passeront par les trois côtés de chaque triangle, …l que *sot* ou *otu*, qui forme la moitié d'un rhombe coupé dans … sens de sa petite diagonale; et puisque ces plans passent en …ême temps par le centre *c*, ils détacheront une pyramide trian…ulaire ou un tétraèdre, tel *cots*, fig. 9. Donc le dodécaèdre se …ouvera décomposé en vingt-quatre tétraèdres, dont chacun …ura pour faces quatre triangles isoscèles égaux. Ces tétraèdres …nt des sphénoèdres, dont les angles dièdres sont de 60° et … 90°.

§ 6. *Des molécules intégrantes et soustractives.*

Haüy, à qui l'on doit la connaissance de ces faits importants, remarque que cette espèce d'anatomie d'un cristal, cette sorte de division mécanique qui semble pouvoir se continuer indéfiniment, doit nécessairement avoir un terme, si l'on se place au point de vue de la physique moléculaire. Ce terme, nos instruments ne sont pas assez parfaits, nos organes ne sont pas assez délicats pour nous permettre de l'atteindre; les sous-divisions que nous opérons réellement s'arrêtent bien en deçà; mais nous pouvons franchir par la pensée l'intervalle qui nous en sépare, et nous transporter ainsi tout d'un coup à la limite de toute division possible, du moins de toute division purement physique, et ressemblant par sa nature, comme par ses résultats, aux divisions successives, qui nous faisaient tendre vers le terme dont il est question. Il faut donc admettre, pour chaque espèce de solide donné par le clivage, une limite absolue de petitesse, une particule extrême, qu'on ne peut plus subdiviser ultérieurement, de manière à obtenir encore la même forme avec des dimensions seulement plus petites. Haüy donne le nom de *molécules intégrantes*, à ces particules extrêmes, quand elles sont à la fois et le dernier terme et le terme le plus simple de la division mécanique; et d'après ce qui précède, tout cristal a pour molécule intégrante, ou un tétraèdre, ou un prisme triangulaire, ou un parallélipipède. Il donne le nom de *molécules soustractives*, aux particules extrêmes, quand elles ont la forme du parallélipipède, et cela, pour des raisons que nous ferons bientôt connaître, en exposant la théorie de ce savant sur la structure des cristaux. Dans cette théorie, les molécules de forme parallélipipédique sont considérées comme les éléments de premier ordre du cristal : en se réunissant entre elles par séries linéaires ou planes, elles forment des files ou lames composées de molécules, et ces rangées ou lames deviennent des éléments de second et de troisième ordre, à l'aide desquels les variations et les lois de la structure cristalline se déterminent d'une manière simple et rigoureuse. Dans beaucoup d'espèces minérales, la molécule soustractive et la molécule intégrante ne sont qu'une seule et même chose : il n'en est pas de même dans les minéraux qui ont pour forme primitive un prisme hexaèdre, ou un octaèdre; dans ce cas, la molécule

ntégrante est le prisme triangulaire ou le tétraèdre; la molé:ule soustractive est un parallélipipède, formé par le groupenent d'un certain nombre de molécules intégrantes, prismatiques ou tétraèdres.

§ 7. *Du noyau commun à tous les cristaux secondaires dans la même espèce minérale.*

On doit encore à Haüy une autre remarque fort importante, et dont il a su tirer un parti très-avantageux dans le développement de sa théorie cristallographique. Nous avons vu que les directions de clivage étant constantes et en nombre déterminé dans tous les cristaux de la même espèce, quelles que soient leurs formes extérieures, il était possible d'en extraire par le clivage un solide de forme invariable, et par conséquent de ramener tous les cristaux secondaires à une seule et même forme par une opération qui revient à dégrossir chaque cristal en enlevant ses parties extérieures.

Supposons un minéral qui soit capable de donner un solide de clivage complet, comme le calcaire spathique, et représentons-nous les différentes formes secondaires de ce minéral, ramenées par la pensée à leur parfaite symétrie, comme elles le sont toujours dans les figures de nos Traités de Minéralogie ou dans les modèles en bois de nos collections. Enfin, dans chacune d'elles, portons notre attention sur le groupe de molécules qui en occupe le centre, et qui représente la plus petite particule semblable à la forme primitive. Il est clair que cette particule centrale, la même pour toutes les formes secondaires, sera dans chacune d'elles recouverte de couches successives, parallèles à ses diverses faces, et que le clivage pourrait isoler, s'il était possible de le poursuivre jusqu'à sa limite; et si l'on prend celles de ces couches qui sont du même ordre par rapport à la particule centrale, et qu'on les combine entre elles, ou aura une suite d'enveloppes polyédriques, superposées l'une à l'autre, qui feront croître le volume de cette particule sans en changer la forme, depuis le centre du cristal secondaire jusqu'au moment où ces enveloppes atteignent sa surface. Passé ce terme, les nouvelles couches qu'il faudrait ajouter pour achever la synthèse du cristal, ne recouvriraient plus d'une manière continue le noyau déjà formé, et au lieu de s'accroître, elles iraient au con-

traire en diminuant d'étendue successivement; mais laissons de côté cette circonstance sur laquelle nous reviendrons bientôt. Le raisonnement qui précède suffit pour montrer que de tous les cristaux secondaires d'un même minéral, il doit être possible d'extraire par le clivage un solide de forme invariable, qui en occupe le centre comme une sorte de noyau, et qui est inscrit symétriquement dans la forme secondaire, de telle sorte que les faces de celle-ci l'enveloppent entièrement et le touchent toujours, soit dans ses arêtes, soit dans ses angles solides.

Telle est la raison pour lesquelles Haüy a donné le nom de *noyau* au solide de clivage que l'on peut retirer de tous les cristaux secondaires, à la forme primitive à laquelle ils peuvent tous être ramenés par la division mécanique. Pour démontrer clairement l'existence de ce noyau commun dans chaque cristal secondaire, nous sommes partis du centre du cristal, et nous avons supposé celui-ci se formant et s'accroissant successivement par couches parallèles aux diverses directions de clivage; mais nous aurions pu parvenir au noyau d'une autre manière, en partant du cristal secondaire complet, et en clivant celui-ci obliquement par rapport à ses faces, par conséquent en le tronquant réellement à l'aide du clivage sur ses arêtes ou sur ses angles, et observant dans ces troncatures réelles la même symétrie qui nous a servi de règle, lorsque, par des troncatures purement rationnelles, nous avons rendu compte du passage d'une forme cristalline à une autre forme dans le même système. C'est le moyen que Haüy a employé pour prouver matériellement l'existence du noyau dans un grand nombre de substances, dans le calcaire spathique, la fluorine, la barytine, la galène, la blende, etc. Ce fait étant devenu la base de sa théorie de la structure des cristaux, il lui importait de le mettre dans tout son jour; citons un des exemples qu'il en a donnés, en le prenant dans le calcaire spathique, un des minéraux dont il est le plus facile de se procurer des cristaux, et sur lequel on pourra vérifier l'exactitude des observations suivantes.

Le calcaire spathique appartient au système rhomboédrique, et son solide de clivage est un rhomboèdre obtus de 105°5', représenté fig. 11. Il s'agit de faire voir que si l'on divise les différents cristaux de la même substance, par des coupes qui se correspondent symétriquement sur les parties identiques, on arrivera toujours à un noyau central, qui sera constant pour tous ces cristaux, même pour ceux dont les formes contrastent le

plus fortement entre elles, et qui, de plus, sera semblable au rhomboèdre fig. 11.

Soit *abcdef* (fig. 12), un des deux prismes hexaèdres réguliers, qui figurent au nombre des formes secondaires du carbonate de chaux, et supposons que ce soit le prisme de la première espèce, celui qui est produit par une modification sur les angles latéraux du rhomboèdre primitif. On trouvera que parmi les six arêtes de la base supérieure, il y en a trois *in*, *cb*, *ah*, qui se prêtent à la division mécanique, et que celle-ci a lieu suivant des coupes telles que *psul*, également inclinées sur la base du prisme; tandis qu'il sera tout-à-fait impossible d'en opérer de semblables sur les trois arêtes intermédiaires *nc*, *ba*, *hi*.

Ce sera tout le contraire par rapport à la base inférieure; car les arêtes de cette base, qui admettront des divisions, seront opposées aux arêtes non clivables de l'autre base, c'est-à-dire que ce seront les arêtes *kr*, *gf*, *ed*. Le plan *lqyz* représente la section faite sur cette dernière arête. On aura donc six plans mis à découvert par les sections; et si l'on continue de diviser toujours parallèlement à ces sections, jusqu'à ce que toutes les faces du prisme hexagonal aient disparu, on arrivera à un rhomboèdre qui en sera comme le noyau, et que la figure 12 représente dans son rapport de position avec ce prisme.

Tout autre cristal de la même espèce, divisé mécaniquement avec soin et selon les règles de la symétrie, donnera un résultat analogue. Il ne s'agit que de reconnaître dans chaque forme particulière le sens des coupes, qui conduisent au rhomboèdre central. Parmi les variétés du calcaire, on connaît plusieurs rhomboèdres secondaires, qui diffèrent beaucoup du noyau par la mesure de leurs angles. Les figures 13, 14 et 15 représentent les plus communs, ceux auxquels Haüy a donné les noms d'*équiaxe*, d'*inverse* et de *contrastant*. Chacun de ces rhomboèdres en renferme un autre, qui est semblable au noyau du prisme hexagonal, et que nous mettrons à découvert, en enlevant avec précaution toutes les couches de molécules qui l'enveloppent et le déguisent à nos yeux. Prenons d'abord pour exemple le rhomboèdre, équiaxe fig. 13, qui est un rhomboèdre obtus de 134°57', et que la figure représente avec le noyau qui lui est inscrit. Dans ce cas, les coupes devront être dirigées de manière à être parallèles aux diagonales obliques A*x*, A*r* de deux faces adjacentes vers un même sommet du rhomboèdre secondaire. On pourra donc obtenir tout d'un coup le noyau de ce

rhomboèdre, en faisant passer trois plans par le sommet A, et les diagonales A*r*, A*x*, A*u*, prises deux à deux, ce qui donnera la moitié supérieure du noyau, et en répétant des sections analogues vers l'autre sommet, ce qui achèvera de dégager ce noyau. Il suit de là que l'axe du rhomboèdre secondaire est égal à celui du noyau, ce qui a valu à ce rhomboèdre le nom d'*équiaxe*. On voit, de plus, que les bords supérieurs de ce dernier se confondent en direction avec les diagonales obliques du premier, et que ses angles latéraux E, O, I, K sont tournés vers les faces du même rhomboèdre, en sorte que les deux formes sont dans une position inverse l'une par rapport à l'autre.

Passons maintenant au rhomboèdre aigu que l'on voit fig. 14, et que Haüy a nommé *inverse*, pour une raison que nous ferons connaître par la suite. Ce rhomboèdre a ses angles dièdres des sommets de 78° 51'; il est divisible par des plans qui abattent les arêtes terminales S*u*, S*n*, S*t* d'une part, et S'*u'*, S'*n'*, S'*t'* d'une autre part, en faisant des angles égaux avec les faces qu'ils entament. Le résultat est le rhomboèdre obtus A A', semblable à celui que nous avons retiré du prisme hexagonal et du rhomboèdre équiaxe, et qui, dans ce cas, est tellement situé à l'égard du rhomboèdre secondaire, que ses faces sont parallèles aux arêtes de celui-ci. Les rhomboèdres sont encore ici en position inverse l'un par rapport à l'autre.

La figure 15 représente un autre rhomboèdre plus aigu, circonscrit de même à son noyau : c'est celui que Haüy nomme *contrastant*, et dont l'angle dièdre au sommet est de 65° 50'. On voit à l'inspection de la figure, que, dans ce cas, les faces du rhomboèdre secondaire correspondent à celles du noyau, mais qu'elles font avec l'axe des angles beaucoup plus aigus. Les sections auront donc lieu sur les sommets dans trois directions parallèles aux diagonales horizontales des faces culminantes.

Considérons maintenant des cristaux secondaires d'une autre forme, par exemple, des scalénoèdres, tels que ceux que représentent les figures 16, 17 et 18. Le premier est celui que l'on rencontre le plus habituellement dans le calcaire spathique, et auquel Haüy a donné le nom particulier de *métastatique*. Pour obtenir tout d'un coup le noyau de ce scalénoèdre, on fera passer une première section par les deux arêtes latérales EO, OI, une seconde par les arêtes IK, KG, une troisième par les arêtes GH, HE; ces trois sections mettront à découvert les trois faces du sommet supérieur du noyau. On répètera ensuite la même

opération, en reprenant les mêmes arêtes deux à deux, mais dans l'ordre alternatif, c'est-à-dire qu'on fera une section suivant les lignes OI, IK; une seconde suivant KG, GH; une troisième suivant HE, EO; et l'on achèvera d'isoler le noyau). On voit par la figure 16, que les faces du scalénoèdre le touchent dans ses arêtes latérales.

La figure 17 représente un autre scalénoèdre dont les faces touchent le noyau inscrit dans ses arêtes culminantes. La manière d'obtenir tout d'un coup ce noyau s'offre d'elle-même, à l'inspection seule de la figure.

Les deux scalénoèdres précédents dériveraient du rhomboèdre primitif, ou du noyau commun, par des modifications sur les arêtes. On voit, fig. 18, un troisième scalénoèdre, qui ne peut provenir que d'une modification sur les angles solides latéraux, car ses faces sont deux à deux tangentes à l'un de ces angles solides, et aucune d'elles ne passe par les arêtes du noyau. Les sections auront donc lieu de biais, sur les angles solides, de manière à intercepter des portions de chacune des arêtes qui les composent. Nous nous bornerons à ce petit nombre d'exemples; tous les cristaux calcaires donneraient des résultats analogues.

Le fait que nous venons d'établir à l'égard du calcaire spathique est général: les cristaux de toutes les autres substances minérales, soumis successivement à la division mécanique, donneraient de même un noyau d'une forme constante, mais qui serait particulière pour chaque espèce.

Les formes de tous les noyaux, dont Haüy a reconnu l'existence, se rapportent aux cinq genres suivants: le tétraèdre, le parallélipipède, l'octaèdre, le prisme hexaèdre régulier et le rhombo-dodécaèdre.

§ 8. *De la structure des formes secondaires. — Théorie des décroissements.*

Nous connaissons maintenant les principaux résultats d'observation relatifs à cette propriété si curieuse des cristaux, qu'on nomme le clivage. Pour pénétrer plus avant dans l'étude de la structure, il faudrait en raisonnant sur les faits qui nous sont acquis, chercher à en déduire une théorie qui nous expliquât, d'une part, l'uniformité que présente la structure dans tous les cristaux de la même espèce, quand on la considère à l'intérieur

de la masse, et, d'une autre part, les variations infinies qu'ils peuvent subir, malgré cette circonstance, dans leur configuration extérieure. Or, ce travail, Haüy l'a entrepris et exécuté de la manière la plus heureuse. Essayons donc de donner une idée de la théorie des lois auxquelles est soumise la structure des cristaux, théorie qui n'est pas moins remarquable par la simplicité et la fécondité de ses résultats, que par son évidence incontestable.

Nous avons vu comment Haüy, par les considérations des clivages qui se répètent en divers sens, démontre qu'un cristal est mécaniquement divisible en une multitude de petits parallélipipèdes similaires, juxta-posés entre eux, qui peuvent, à leur tour, se subdiviser de plus en plus sans changer de forme; et comment, après avoir opéré en réalité cette subdivision progressive et l'avoir poussée jusqu'au point où, par l'imperfection de nos sens, elle cesse d'être praticable, il la continue par la pensée et la conduit jusqu'à sa dernière et véritable limite, sa limite naturelle : car, en raisonnant dans l'hypothèse atomistique, on est forcé de reconnaître que cette division mécanique doit avoir un terme; elle peut aller jusqu'à la molécule physique du cristal, ou bien rester en deçà, mais elle ne saurait, en aucun cas, dépasser cette molécule.

Il résulte donc clairement de cette espèce d'anatomie du cristal, que l'on peut concevoir celui-ci comme un assemblage continu de petits éléments polyédriques, tous semblables de forme et juxta-posés par leurs faces. Ces particules cristallines, que Haüy nomme *molécules intégrantes* ou *molécules soustractives*, selon qu'elles ne souffrent plus du tout de diminution de volume, ou qu'elles sont encore susceptibles d'une dernière subdivision dans des directions obliques aux faces, sont pour lui les éléments de la structure du cristal.

Haüy a cru pouvoir admettre, sans inconvénient, et comme une supposition fort naturelle, que ces petites particules polyédriques ne sont rien autre chose que les véritables molécules physiques du corps cristallisé, et c'est pour cela qu'il les a constamment désignées, en employant ce nom de molécules. Mais il importe de remarquer que, dans l'exposé de sa théorie, c'est là une hypothèse tout-à-fait superflue, dont il aurait pu parfaitement bien s'abstenir, en sorte qu'on ne serait nullement en droit de la tourner contre la probabilité de la théorie elle-même, dans le cas où cette hypothèse viendrait à être infirmée. Il a pris soin lui-même

le faire cette remarque, pour prévenir toute objection à cet égard, comme on peut le voir dans son *Traité de Cristallographie*, t. I, p. 50 : « J'observerai, dit-il, que si ces corpuscules auxquels » j'arrive, en continuant par la pensée la division mécanique » jusqu'à sa limite, ne représentent pas exactement ceux sur les- » quels agit l'affinité dans la production des cristaux, ils nous en » offrent les équivalents; et les résultats que nous obtenons, en » les adoptant, sont si parfaitement conformes à l'observation, » que nous ne serions pas censés nous être trompés, en prenant » *les molécules de la théorie* pour celles de la nature. »

Cette théorie, que Haüy a développée sous le nom de *Théorie de décroissements*, est donc, d'après l'opinion même de ce savant, tout-à-fait indépendante de l'idée qu'on peut se faire de la nature des particules intégrantes, et de leurs rapports avec les *vraies molécules* de la substance. Elle n'envisage, dans ces particules, que leur forme; elle ne voit en elles que de petits espaces polyédriques, régulièrement juxta-posés, et dans lesquels le cristal entier, considéré lui-même comme corps géométrique, est décomposable.

§ 9. *Véritable signification de la particule intégrante.*

Mais, si la théorie des décroissements, à l'aide de laquelle on explique la diversité des formes secondaires, n'exige pas absolument qu'on se prononce sur la nature de la particule intégrante, il est cependant très-important pour la physique des cristaux, de savoir quelle est la signification réelle de cet élément polyédrique, et s'il diffère de la véritable molécule physique, c'est-à-dire du groupe défini d'atomes qui constitue la substance matérielle, abstraction faite de son état cristallin. Or, pour y parvenir, il suffit de reprendre le raisonnement que faisait Haüy sur le clivage, en cherchant à interpréter plus rigoureusement qu'il ne l'a fait les résultats de cette division mécanique (1).

Supposons donc une substance, comme la karsténite, par exemple, qui soit clivable dans trois directions triangulaires, et voyons ce qui résulte purement et simplement de l'existence simultanée de ces trois clivages. De la possibilité d'un clivage dans une première direction plane, nous sommes seulement autorisés à conclure que les molécules de cristal, considérées comme des

(1) C'est ce que nous avons fait dans notre Mémoire, qui a pour titre : *Recherches sur la Cristallisation*, etc., et que nous avons déjà cité.

points matériels, sont distribuées dans la masse sur une série de plans, parallèles entre eux et à cette direction. Elles forment donc des couches superposées, au moins dans un sens : voilà tout ce qui résulte du fait de ce clivage, et jusque-là nous ignorons encore si les molécules d'une même couche, telle que ABCD, fig. 1, pl. I, seront arrangées entre elles d'une manière confuse ou régulière. Mais si, à ce premier clivage, qui a lieu horizontalement, par exemple, s'en joignent deux autres, dans des directions verticales marquées par les lignes AB, AC, lesquels clivages couperont en travers la série des couches horizontales, on tirera une conséquence semblable pour chacun d'eux, c'est-à-dire qu'il faudra que les molécules soient de même distribuées sur des séries de plans verticaux et parallèles, non-seulement dans le sens de AB, mais encore dans celui AC. Par conséquent, il sera nécessaire que les molécules soient espacées d'une manière uniforme et symétrique, tant dans la masse entière du cristal, que dans chacune des couches en particulier; il faudra qu'elles aient leurs centres de gravité aux points d'intersection de trois séries de plans parallèles, et présentent dans leur ensemble une sorte de configuration en quinconce, ou l'image d'un réseau continu à mailles parallélipipédiques, si l'on considère les trois dimensions à la fois, et à mailles parallélogrammiques, si l'on n'envisage que les molécules d'une seule couche (*voyez* fig. 3).

Il faut se représenter les molécules comme fixées aux points dont nous parlons, non d'une manière inébranlable, mais dans un état d'équilibre stable, et il est clair qu'elles doivent former en différents sens des files rectilignes et parallèles, dans chacune desquelles leurs centres sont équidistants. Celles de ces files qui se trouvent sur un même plan, sont pareillement à des distances égales les unes des autres.

Il est évident d'après cela que la molécule intégrante ou soustractive de Haüy n'est que le plus petit des parallélipipèdes, que forment entre elles les molécules voisines, et dont elles marquent les sommets; ou, si l'on veut, elle n'est que la représentation des petits espaces intermoléculaires, ou des mailles du réseau cristallin. Ce que Haüy considère comme les dimensions de sa molécule hypothétique, n'est rien autre chose que les distances moléculaires, que les intervalles qui séparent les molécules réelles, dans les directions des arêtes ou des axes de la forme primitive.

üy est donc allé au-delà des faits et des conséquences qu'on légitimement en tirer, lorsqu'il a identifié les particules llines avec les atomes physiques du corps cristallisé; mais que les molécules soustractives existent réellement dans le l, et que Haüy n'a pu se méprendre que sur leur nature, mmet une erreur en les confondant avec les véritables mo-es, cette erreur a par elle-même peu d'inconvénient, car n'affecte que le langage dont il se sert, et n'atteint pas sa rie, qui en est complètement indépendante.

raisonnement précédent, par lequel nous avons expliqué énomène du clivage, prouve la nécessité d'établir une dis-ion entre la molécule physique et la particule intégrante. remière est pour nous l'élément atomique du corps, à part e considération d'état cristallin. La seconde n'est que l'élé-t de sa structure géométrique, quand il se présente sous cet particulier; elle ne précède point l'acte de la cristallisation, elle en est le produit, et n'existe que dans le cristal tout é. Cette distinction est d'autant plus importante, que, dans grand nombre de cas, les véritables molécules paraissent r un type géométrique différent de celui que Haüy leur assi- C'est ce que nous chercherons à démontrer par la suite, et pourquoi nous avons cru devoir faire ici des réserves con-ant la forme réelle des molécules.

§ 10. *Suite de la théorie des décroissements.*

evenons maintenant à l'exposé de la théorie, tel que Haüy résenté lui-même. Nous avons reconnu dans les cristaux sus-ibles de clivage, la réalité de ces petits éléments polyédri-, qui sont les dernières particules du cristal; rien ne s'oppose que nous les appelions, avec Haüy, les *molécules intégrantes*, vu que nous nous rappelions, quand il sera nécessaire, la inction que nous établissions tout-à-l'heure. Ainsi donc, un e de galène peut être considéré comme l'assemblage d'une ité de petites particules ou molécules cubiques, apposées les aux autres par leurs faces; un rhomboèdre de calcaire spa-ue, comme une réunion de petits rhomboèdres juxta-posés; risme rectangulaire de karsténite, comme un ensemble de s prismes rectangles, et ainsi des autres formes primitives. ont là, avons-nous dit, les éléments de premier ordre du al; mais en les prenant par séries linéaires, on a des files ou

rangées rectilignes de molécules, qui sont des éléments de second ordre; et en groupant ensemble toutes les files dont les axes ou lignes centrales sont sur un même plan, on a des lames planes, des couches de molécules de la plus petite épaisseur possible, et qui constituent une troisième sorte d'éléments. C'est à l'aide des molécules simples, des rangées linéaires et des lames planes de molécules, que Haüy parvient à refaire la synthèse des cristaux secondaires, après les avoir analysés par le clivage, et à formuler d'une manière très-simple les lois de leur structure.

D'abord, il fait remarquer que dans une lame composée de molécules prismatiques, on peut distinguer des files ou rangées droites de molécules, dans une multitude de directions différentes. Soit ABCD (fig. 19, 20 et 21) une des faces d'un noyau que, pour plus de simplicité, nous supposerons être un cube; cette face est sous-divisée en une multitude de petits carrés, qui sont les facettes extérieures d'autant de molécules cubiques. On peut y concevoir trois sortes de rangées de molécules. La première sorte se compose de molécules simples, réunies par leurs faces : telles sont les rangées EF, GH (fig. 19). La droite, qui marque leur direction et qui passe par les centres de toutes les molécules, est parallèle à l'un des bords du noyau. Dans la seconde sorte de rangées, les molécules qui forment comme les unités de la série, sont encore simples, mais elles se réunissent par une de leurs arêtes, en formant des rentrées et des saillies alternatives; la ligne centrale est alors parallèle à l'une des diagonales du noyau. Telles sont les rangées de molécules *ab*, *cd*, *ef*, etc., fig. 20; afin de rendre ces rangées en diagonale plus faciles à saisir, nous avons ombré les molécules qui composent une partie des séries. Enfin, la troisième espèce de rangées, représentée fig. 21 et 22, est formée de molécules composées, qui résultent du groupement de molécules simples, prises deux à deux, trois à trois, quatre à quatre, etc. Ces molécules complexes se réunissent de même par leurs arêtes, comme celles des rangées de la seconde espèce; mais la ligne centrale étant parallèle à l'une de leurs diagonales, se trouve, par cela même, inclinée en même temps au côté et à la diagonale des molécules simples, et par conséquent aussi du noyau. La fig. 21 représente des rangées de molécules *ab*, *cd*, *ef*, etc., composées de molécules doubles. La figure 22 représente une lame rhomboïdale, dans laquelle les molécules prises six à six composent des files de direction oblique. Ces exemples suffisent pour montrer que l'on peut concevoir dans une lame

cristalline des rangées de molécules dont la direction soit variable presque à l'infini, et intermédiaire entre celle des bords et celle des diagonales du noyau.

Il est aisé maintenant de se rendre compte, comme le fait Haüy, des différences que présentent dans leur structure les cristaux secondaires d'un même minéral. Puisque tous ces cristaux renferment un noyau commun, lequel est clivable parallèlement à toutes ses faces, aussi bien que la matière qui le recouvre, il s'ensuit que l'on peut concevoir chacun d'eux comme formé de deux parties, savoir : d'une partie commune (le noyau), et d'une seconde partie, variable de l'un à l'autre, et qui se compose de lames cristallines, empilées sur les différentes faces de ce noyau. Or, la variation de la partie enveloppante ne peut provenir que des *décroissements*, ou diminutions d'étendue que subissent les lames cristallines, qui s'élèvent en pyramide au-dessus de chaque face du noyau ; et, comme les faces secondaires ne sont autre chose que la somme des bords terminaux des lames superposées, lesquels viennent tous s'aligner sur des plans, il est nécessaire que ces bords soient rectilignes, et que par conséquent les décroissements des lames se fassent par des soustractions d'une ou de plusieurs rangées de molécules, du genre de celles que nous considérions tout-à-l'heure. Et pour que les faces qui résultent d'un pareil décroissement, continué indéfiniment, soient planes, et non pas courbes, il faut que ce décroissement soit uniforme, c'est-à-dire qu'il ait lieu toujours par la soustraction d'un même nombre de rangées égales, pour chacune des lames superposées. Enfin, il faut que ce décroissement s'opère tantôt parallèlement aux arêtes du noyau, tantôt parallèlement à ses diagonales, ou bien encore dans un sens intermédiaire, puisque les faces des solides secondaires circonscrivent le noyau dans toutes sortes de directions, en le touchant soit dans un de ses bords, soit dans un de ses angles. Telle est l'idée fondamentale de la théorie de Haüy, qui porte le nom de *Théorie des décroissements*.

Avant d'aller plus loin, et d'entrer dans les développements et les applications de cette théorie, il est bon de remarquer qu'il n'y a rien d'hypothétique dans tout ce que nous venons de dire, rien qui ne puisse être confirmé par l'observation directe. C'est un fait bien constant, que tous les cristaux secondaires renferment un noyau commun, qu'il est facile d'extraire dans un grand nombre de cas ; c'est encore un fait incontestable, que

la portion de la matière enveloppante que l'on enlève pour mettre à découvert une quelconque des faces du noyau, se termine toujours extérieurement en un sommet pyramidal ou cunéiforme. Aussi, lorsqu'au lieu d'enlever ce sommet tout d'une pièce, on détache successivement les lames dont il se compose, on reconnaît que ces lames, telles que *mn*, *m'n'*, *m''n''*, etc., fig. 16, pl. XV, augmentent progressivement en étendue, à mesure qu'on approche du noyau; d'où il suit que, si on les prend dans l'ordre inverse, en commençant par celle qui est en contact avec le noyau, elles doivent aller en décroissant à mesure qu'elles s'en éloignent. C'est donc un fait d'observation facile à vérifier, que les lames décroissent, au moins dans certains sens, à partir du noyau; et ce fait une fois admis, il ne s'agit plus, pour expliquer les variations de forme et de structure des cristaux secondaires, que de placer sur les différentes faces du noyau, des lames composées de molécules semblables à celles dont il est formé lui-même, et de faire décroître régulièrement ces lames de toutes les manières possibles, soit sur leurs bords, soit sur leurs angles; en ayant soin que les mêmes décroissements se répètent sur toutes les parties du noyau qui sont identiques, et en faisant varier successivement la *direction* et la *quantité* de chaque décroissement, on obtiendra chaque fois une enveloppe de forme déterminée, qui représentera l'une des formes secondaires. C'est ainsi que Haüy s'y est pris pour expliquer non-seulement tous les cristaux qui étaient connus de son temps, mais encore pour prévoir l'existence et faire d'avance le calcul d'un grand nombre de formes, qu'il n'avait pas encore eu l'occasion de voir, et que l'observation a fait découvrir par la suite.

§ 11. *Développements et applications de la théorie. — Décroissements sur les arêtes.*

C'est par des soustractions d'une ou de plusieurs rangées de molécules, soit simples, soit composées, que s'opèrent les décroissements des lames appliquées sur le noyau. Lorsque les rangées moléculaires sont parallèles aux bords ou arêtes du noyau, les plans secondaires qui résultent de l'affleurement et du nivellement des tranches des lames successives, sont tangents aux arêtes du noyau: Haüy nomme *décroissements sur les bords ou arêtes*, ceux qui remplissent cette condition. Ils ont pour effet

le produire ce que nous avons appelé jusqu'ici une modification sur les arêtes. Haüy nomme *décroissements sur les angles*, ceux dans lesquels la direction des rangées soustraites coupe transversalement les arêtes d'un même angle plan du noyau, auquel cas le plan résultant touche dans son sommet un des angles solides de ce noyau, et répond par conséquent à ce que nous avons appelé une modification sur les angles. Nous retrouvons donc ici, comme cela ne pouvait manquer d'être, les mêmes divisions et distinctions que nous avons admises dans la méthode des Troncatures; seulement, l'auteur de la théorie des Décroissements a cru devoir établir une subdivision parmi les Décroissements sur les angles, et distinguer deux cas : celui des *décroissements ordinaires sur les angles*, et celui des *décroissements intermédiaires*. Les décroisements ordinaires sont ceux qui se font par la soustraction de rangées de molécules simples, parallèles à une diagonale; les décroissements intermédiaires sont ceux qui se font par des rangées de molécules composées, dans une direction oblique tout à la fois aux arêtes et aux diagonales du noyau. Cette distinction par elle-même a peu d'importance : comme on le verra bientôt, le décroissement ordinaire ou décroissement sur les angles (proprement dit), n'est qu'un cas particulier et une limite simple du décroissement intermédiaire, ce dernier pouvant embrasser dans sa formule générale tous les cas possibles de décroissement sur les angles. Ces notions deviendront plus claires par les exemples que nous allons donner des diverses espèces de décroissement admises par Haüy.

Soit EI' (fig. 23, pl. XV) un cube, faisant fonction de noyau, et que nous nous représenterons comme un assemblage de petites particules intégrantes de la même forme, et par conséquent cubiques. Concevons que l'on applique sur chacune de ses faces une série de lames décroissantes, composées de pareilles molécules, et dont chacune ait vers chacun de ses bords une rangée de molécules de moins que celle qu'elle recouvre. Il est facile de voir que les différentes piles de lames produiront six pyramides quadrangulaires, qui reposeront sur les faces du cube, et dont les pans offriront l'image d'un gradin régulier ou d'un escalier à marches égales. Cet assortiment est représenté par la figure 23, qui ne montre que trois des pyramides surajoutées au noyau, afin de laisser voir celui-ci; il est facile de suppléer les autres par la pensée.

Les faces des pyramides sont triangulaires, et comme il y a six pyramides, on a par conséquent vingt-quatre triangles, tels que E*s*O, O*s*I, O*t*I, etc., fig. 23 et 24; mais parce que le décroissement est uniforme depuis *s* jusqu'à *t*, dans toute l'étendue des deux triangles adjacents O*s*I, O*t*I sur les pyramides voisines, il en résulte que les triangles pris deux à deux sont de niveau, et par leur réunion sur un même plan forment un rhombe. La surface du solide sera donc composée de douze rhombes égaux; et comme chacun de ces rhombes est posé symétriquement sur une arête du noyau, faisant avec les faces de celui-ci des angles de 45°, on voit que ce dodécaèdre est parfaitement déterminé, et qu'on a toutes les données nécessaires pour calculer ses angles. Cette forme secondaire est le rhombododécaèdre, que nous savons être une des formes les plus simples du système cubique.

Dans la figure 23, les cannelures formées par les saillies et rentrées alternatives des lames décroissantes sont très-sensibles, parce que nous avons employé, comme éléments de ces lames, des cubes de dimensions appréciables. Mais, si l'on substitue par la pensée à cette construction grossière, celle de la nature, dans laquelle les molécules intégrantes sont infiniment petites, celles-ci deviendront imperceptibles; les lames seront d'une minceur extrême, les inégalités des faces échapperont à nos sens, et les faces de la pyramide s'offriront sous l'aspect de plans continus, du moins si l'on suppose que la cristallisation a atteint tout le fini dont elle est susceptible.

Haüy énonce le résultat que nous venons de décrire, en disant que le dodécaèdre rhomboïdal peut être produit par un décroissement d'une seule rangée de molécules simples, parallèlement à toutes les arêtes d'un noyau cubique.

Si l'on imagine que les lames surajoutées au noyau décroissent par deux, trois rangées, ou davantage, toujours parallèlement aux différents bords du cube primitif, alors les pyramides étant surbaissées, leurs faces ne pourront plus se trouver deux à deux sur un même plan, en sorte que la surface du solide secondaire sera composée de vingt-quatre triangles distincts. On aura dans ce cas l'hexatétraèdre (fig. 6, pl. IV).

La figure 31, pl. XV, représente l'effet initial d'un décroissement par deux rangées de molécules cubiques. Le petit triangle *tux*, dont les côtés *tu*, *ux* sont doubles l'un de l'autre, l'un étant égal à deux largeurs de molécules, et l'autre à une hauteur, et

dont le côté tx marque la direction de la face secondaire, est appelé par Haüy, *triangle mensurateur;* ce triangle lui fournit toutes les données nécessaires, soit pour exprimer la loi du décroissement, soit pour en calculer le résultat. On se représentera facilement des décroissements par trois, par quatre rangées, ou davantage; il est clair que l'inclinaison de la ligne directrice tx sera différente pour chacun de ces décroissements, et que connaissant leur mesure, on pourra facilement déterminer l'inclinaison de la face résultante.

Les lames successives sur lesquelles le décroissement s'opère uniformément, peuvent être, comme dans les cas que nous venons d'examiner, des lames simples, n'ayant que l'épaisseur d'une molécule; dès-lors elles ne peuvent décroître en hauteur que par une *seule rangée*, mais elles peuvent perdre en largeur plusieurs rangées; tout l'effet du décroissement se porte donc dans le sens de la largeur : c'est, suivant l'expression d'Haüy, un *décroissement en largeur*. Supposons qu'il y ait un nombre m de rangées soustraites en largeur, si nous convenons avec Haüy de représenter la loi du décroissement par une fraction dont le numérateur exprime le nombre de rangées soustraites en largeur, et le dénominateur celui des rangées soustraites en hauteur, le signe d'un décroissement en largeur sera $\frac{m}{1}$, ou simplement m, c'est-à-dire que la quantité qui marque la loi d'un pareil décroissement, est toujours un nombre entier.

Mais il peut se faire que les lames atteintes à la fois par le décroissement soient composées de plusieurs lames simples, qui semblent n'en faire qu'une; on voit, par exemple, figure 32, des lames doubles de molécules cubiques, qui subissent un décroissement d'une seule rangée en largeur, mais qui perdent deux rangées en hauteur; c'est l'inverse du cas que nous considérions il n'y a qu'un instant. La loi de ce décroissement aura donc pour expression $\frac{1}{2}$, ou bien, en généralisant $\frac{1}{n}$; tout l'effet d'un pareil décroissement se portant dans le sens de la hauteur, ce sera un *décroissement en hauteur*. Mais les lames étant composées, il peut se faire que le décroissement participe des deux précédents, qu'il agisse à la fois dans les deux sens, par m rangées en largeur, et par n en hauteur : ce sera alors un *décroissement mixte*, qui aura pour mesure la fraction $\frac{m}{n}$. Les

figures 33 et 34 représentent un décroissement mixte, par deux rangées en largeur et trois en hauteur, et ayant par conséquent pour expression numérique $\frac{2}{3}$.

Au lieu de distinguer, comme le fait Haüy, des décroissements sur les bords, qui ont lieu tantôt en largeur, tantôt en hauteur, sur des lames simples ou sur des lames composées, et par un nombre variable de rangées, mais toujours par des rangées de molécules simples, on pourrait ramener tous ces cas de décroissements à un seul, celui d'un décroissement par une simple rangée, en admettant, pour les décroissements sur les bords, des rangées de molécules *multiples*, ainsi que le fait Haüy pour les décroissements sur les angles. D'après cette manière de voir, le décroissement représenté figure 31, serait un décroissement par une rangée de molécules doubles (les molécules simples s'étant accolées deux à deux dans le sens de la largeur); le décroissement fig. 32 se ferait par des molécules doubles, l'accolement ayant eu lieu ici dans le sens de la hauteur. Le décroissement, fig. 33, serait un décroissement par une rangée de molécules sextuples, formées de molécules simples groupées par deux en largeur, et par trois en hauteur. Nous montrerons bientôt que l'on peut aussi ramener tous les décroissements sur les angles à ce point de vue.

Revenons maintenant aux applications de la théorie, concernant les décroissements sur les arêtes. Supposons un décroissement (fig. 25) qui ait lieu sur la base d'un noyau cubique, parallèlement à l'arête OI, par deux rangées en largeur. Si ce décroissement, qui a lieu au-dessus de OI, sur la base EOI, se répétait au-dessous de OI, sur la face adjacente O'OI, et si la même chose avait lieu pour toutes les autres arêtes, nous aurions pour résultat un solide à vingt-quatre faces, qui serait un hexatétraèdre (*voyez* p. 112), et celui de tous les hexatétraèdres qui résulterait de la loi de décroissement la plus simple parmi celles qui peuvent donner de tels solides. Mais s'il n'y a qu'un seul décroissement pour chaque arête, et que le sens particulier dans lequel ce décroissement agit soit réglé par la symétrie propre aux cubes du système hexadiédrique, on aura pour forme secondaire un dodécaèdre pentagonal, tel que celui que l'on voit figure 26, avec son noyau inscrit.

La figure 26 représente la marche croisée des décroissements sur les faces voisines. On voit que l'effet du décroissement qui

eu lieu sur la base, parallèlement à OI, s'est prolongé de
ıutre côté de cette arête, pour se combiner avec les faces pro-
ıites au-dessus du pan adjacent OII'O'. La figure montre que
tte continuation du premier décroissement, qui forme le
angle O*t*I, pour être considérée comme due à un autre dé-
oissement inverse du premier, c'est-à-dire à un décroissement
ır deux rangées en hauteur, qui a eu lieu sur la face adja-
:nte OII'O', en même temps que le décroissement par deux
ıngées en largeur s'opérait sur la base (1). Ce second décrois-
ment n'est que la répétition en sens contraire du premier dé-
oissement. En général, le même plan, qui est donné par un
écroissement en largeur de *m* rangées, à droite d'une arête
uelconque, peut être aussi produit, à gauche de la même arête,
ar le décroissement en hauteur $\frac{1}{m}$; d'où il suit que toute face
:condaire placée sur une arête, et qui se prolonge des deux
ˌtés de cette arête, offre toujours dans son mode de généra-
on la combinaison des deux espèces de décroissement que
Iaüy nomme décroissement en largeur, et décroissement en
auteur, à moins que l'un des décroissements n'ait lieu par une
mple rangée, car alors le second procède aussi d'après la
ıême loi.

On voit que chacune des parties additionnelles, telles que
;OI*qp*, résulte aussi des deux espèces de décroissements, sa-
oir : d'un décroissement en largeur par deux rangées, paral-
:lement à deux arêtes opposées OI, AE, de la face correspon-
ante du noyau, et d'un décroissement en hauteur par deux
ıngées, parallèlement aux deux autres bords EO, AI, de la
ıême face. Le progrès du décroissement en largeur étant plus
ıpide que celui du décroissement en hauteur, les deux faces
ui naissent du premier doivent être plus inclinées que celles
ui sont produites par le second; en sorte que chaque pile de
ımes décroissantes ne se termine plus en pointe, comme fi-
ure 23, mais en arête *pq*.

Si l'on suppose que les deux décroissements, auxiliaires l'un de
autre, agissent suivant d'autres lois, de manière qu'il y ait trois ou
uatre, etc., rangées, soustraites en largeur ou en hauteur, le
ésultat sera encore un dodécaèdre pentagonal; et il est bien évi-
ent que tous ces dodécaèdres différeront, soit entre eux, soit

(1) Un décroissement, qui vient ainsi continuer l'effet d'un autre décrois-
ment principal, est appelé par Haüy *décroissement auxiliaire*.

avec le précédent, par la mesure de leurs angles. On ne connaît dans la nature qu'un seul dodécaèdre pentagonal complet; c'est celui que l'on observe si fréquemment dans la pyrite et la cobaltine; et il est remarquable que ce soit précisément celui qui corresponde à la loi de décroissement exprimée par la figure 25, c'est-à-dire à la plus simple de toutes celles qui peuvent donner des dodécaèdres pentagonaux. Si l'on construisait sur cette figure le petit triangle mensurateur, qui serait la coupe d'une des marches de l'escalier formé par les lames décroissantes, on aurait évidemment un triangle rectangle semblable à *tux* fig. 26, dont un des petits côtés serait double de l'autre; et la trigonométrie donnerait les moyens de connaître l'angle au sommet de ce triangle, lequel serait juste la moitié de l'inclinaison des deux pentagones à l'endroit de l'arête *pq*. On trouverait ainsi, par un calcul très-simple, pour la valeur de cette inclinaison, 126°52'; or, en mesurant celle qui y correspond sur le dodécaèdre de la pyrite, on trouve précisément la même valeur. C'est ainsi que se vérifie dans chaque cas particulier la théorie des décroissements, et que l'existence de telle ou telle loi de décroissement se confirme par l'accord du calcul avec le résultat de l'observation.

On pourrait se demander si parmi les différents dodécaèdres pentagonaux, qui peuvent dériver du cube par des décroissements sur les arêtes, ne se rencontrerait pas, comme cas particulier, le dodécaèdre régulier de la géométrie. La théorie de Haüy démontre que l'existence de ce dodécaèdre n'est possible en vertu d'aucune loi de décroissement. La raison en est que le rapport entre la largeur et la hauteur de la marche dans le gradin formé par le décroissement, ou, ce qui revient au même, le rapport entre *tu* et *ux*, fig. 26, doit toujours être représenté par des nombres rationnels; or, le calcul fait voir que dans le dodécaèdre régulier le rapport entre les deux dimensions correspondantes est exprimé en nombres irrationnels (1); c'est-à-dire qu'il ne représente par conséquent aucune loi possible de décroissement.

Nous terminerons ce qui regarde les décroissements sur les bords, par un exemple tiré du scalénoèdre métastatique (fig. 16), qui est une des formes les plus ordinaires du calcaire spathique. Le clivage nous a montré que les arêtes latérales de ce solide se

(1) Ce rapport est celui de $\sqrt{5}+1$ à 2.

aient avec les arêtes latérales du noyau, qui est ici un èdre obtus de 105° 5'; d'où il suit que ces dernières nt les lignes de départ des décroissements qui produi- faces triangulaires du scalénoèdre. Il est aisé de voir décroissements ne peuvent se faire par une simple car, dans ce cas, les deux faces produites de part et d'une même arête seraient sur un même plan, et de allèles à l'axe. Un décroissement par une simple rangée rêtes latérales ne peut donc engendrer de scalénoèdre; onne les six pans de l'un des deux prismes hexagonaux partie du système rhomboédrique, savoir: du prisme de espèce, dont les faces sont en position diagonale avec a noyau. Le décroissement le plus simple, parmi ceux vent donner des scalénoèdres, c'est évidemment celui u par deux rangées en largeur : or, le calcul démontre alénoèdre commun du calcaire spathique résulte préci- le cette loi, dont l'effet est représenté par la figure 27; borné à tracer sur cette figure l'espèce de pyramide qui au sommet supérieur du noyau, lequel se trouvant ainsi à découvert, permet de saisir plus facilement la mar- a structure.

illies et rentrées alternatives que forment les lames su- es vers leurs bords décroissants, étant nulles pour nos ns les cristaux de la nature, la ligne E*s* représente une es contiguës au sommet, telle qu'elle se voit sur ces cris- la différence entre le sommet géométrique *s* et le som- sique *s'*, s'évanouit aussi, à cause de son extrême peti- ndis que les lames surajoutées décroissent vers les bords s du noyau, elles prennent au contraire des accroisse- ers les arêtes supérieures, pour qu'il n'y ait point de so- e continuité dans la masse. En général, dans toutes les que les décroissements n'atteignent pas, les lames s'éten- jours, comme elles le feraient si le noyau augmentait de sans changer de forme.

alénoèdre, qui est produit en vertu de la loi par deux , possède une propriété qui consiste en ce que son axe de celui du noyau, et en ce que le rapport des volumes ème que celui des axes, dans les deux solides. Cette pro- st générale, c'est-à-dire qu'elle est indépendante de la articulière des angles du noyau. Il n'en est pas de même itre propriété que Haüy avait cru reconnaître dans le

scalénoèdre ordinaire du calcaire spathique, et qui lui avait fait donner à cette variété particulière le nom de *métastatique*. Cette seconde propriété consistait, suivant lui, en ce que le grand angle des faces du scalénoèdre est égal au grand angle des faces du noyau, et en ce que le plus petit angle dièdre des faces adjacentes, dans un des sommets du scalénoèdre, est égal à l'angle dièdre des faces adjacentes, dans un des sommets du noyau. Il résultait de là que la cristallisation paraissait avoir transporté les angles du noyau sur la forme secondaire. C'est à cette espèce de transport ou de métastase des angles, que Haüy a voulu faire allusion, quand il a donné à la variété dont il s'agit le nom de *métastatique*.

Mais cette propriété n'existe rigoureusement pour cette variété de calcaire, qu'autant que l'on part des données admises par Haüy, pour la détermination du noyau. Ce savant supposait que dans le rhomboèdre primitif du spath d'Islande, les demi-diagonales des faces étaient entre elles dans le rapport de $\sqrt{3}$ à $\sqrt{2}$, d'où il résultait que l'angle dièdre des faces adjacentes prises vers un des sommets, devait être de 104° 28′ 40″. Dans cette supposition, le scalénoèdre ordinaire du carbonate de chaux jouissait bien réellement de la propriété que Haüy lui avait assignée. On sait aujourd'hui que les données qui avaient servi de base aux calculs de ce cristallographe, sont inexactes; que l'angle du noyau, au lieu d'être de 104° 1/2, est de 105° 5′. Il suit de là que le scalénoèdre ordinaire du calcaire n'est plus un scalénoèdre métastatique, ou du moins que l'égalité entre ses angles et ceux du noyau n'a lieu que d'une manière approchée. Le calcul montre que, pour un rhomboèdre obtus, il faut que le carré du rapport entre les diagonales des faces soit un nombre rationnel, pour que l'on puisse obtenir un dodécaèdre métastatique à l'aide d'un décroissement par un certain nombre n de rangées sur les bords inférieurs. Ainsi, la propriété n'a lieu que si les diagonales des faces du noyau ont pour valeurs des quantités rationnelles ou des racines carrées de quantités rationnelles; et cette condition remplie, la mesure du décroissement qui donne le métastatique, dépend encore de la valeur particulière du rapport entre les deux diagonales (1).

Un décroissement par deux, trois, quatre, etc., rangées sur les bords supérieurs du noyau, donnerait aussi un dodécaèdre à faces

(1) Soit α le rapport des diagonales, on a $n=\frac{1}{\alpha^2-1}$. Voyez Haüy, *Traité de Cristallogr.*, 1er vol. p. 330.

triangulaires, qui, en général, sera un scalénoèdre (1), et dont l'axe ne sera plus, comme dans le cas des décroissements sur les bords inférieurs, multiple de celui du noyau, mais égal à l'axe du noyau, ainsi que le fait voir la figure 17; et si l'on supposait sur les mêmes arêtes un décroissement par une simple rangée, on obtiendrait dans ce cas le rhomboèdre *équiaxe*, que la figure 13 représente circonscrit à son noyau. En effet, ce décroissement produira de part et d'autre de chaque bord deux faces qui seront *de niveau*, comme celles qui se forment des deux côtés d'un même bord dans le dodécaèdre originaire du cube (fig. 23); en sorte que le nombre des faces sera de six et que chacune d'elles reposera symétriquement sur une des arêtes culminantes du noyau. On a donc ainsi un rhomboèdre *tangent* au primitif, et qui a le même axe que le noyau. Ce rhomboèdre secondaire est nécessairement plus obtus; il jouit de plusieurs propriétés remarquables qui sont générales, c'est-à-dire qui ont lieu dans tout rhomboèdre tangent, quels que soient les angles du rhomboèdre générateur. Ses diagonales obliques coïncident en direction avec les arêtes culminantes du noyau, et sont de plus doubles en longueur, en sorte que les angles latéraux de celui-ci répondent aux milieux de ses faces. Sa diagonale horizontale est double de celle du noyau, et, par conséquent, si l'on ramenait ce rhomboèdre à des dimensions telles, qu'il eût même projection horizontale que le noyau, comme le font tous les cristallographes *allemands*, l'axe du rhomboèdre secondaire serait la moitié de celui du rhomboèdre primitif.

§ 12. *Décroissements sur les angles.*

Les décroissements dont nous allons maintenant donner des exemples, sont ceux qui ont un angle pour point de départ et dont la direction coupe transversalement les deux côtés de cet angle. Ils ont lieu par des rangées de molécules, qui s'alignent en se touchant, non par des faces, mais par des arêtes; et les éléments composants de ces rangées peuvent être, soit des molécules simples, soit des molécules multiples. Dans le premier cas,

(1) Dans un cas particulier, ce dodécaèdre se changera en une double-pyramide hexaèdre : ce cas est celui du décroissement le plus simple, parmi ceux qui donnent des solides à faces triangulaires, savoir : du décroissement par deux rangées en largeur. Haüy l'a rencontré dans la nature en plusieurs variétés de calcaire spathique, entre autres dans celles qu'il a nommées *sténonome* et *isomeride*.

le décroissement est *ordinaire*, et sa direction est parallèle à une des diagonales de la face sur laquelle le décroissement a lieu; dans le second cas, le décroissement est *intermédiaire*, et sa direction est une ligne située de biais et inclinée à la fois au côté et à la diagonale.

La figure 28 représente un octaèdre régulier qui a pour noyau un cube, dont les angles solides répondent aux centres des faces de l'octaèdre; tel est le cas des cristaux de forme octaédrique que l'on observe dans le sel marin, la galène, etc. Supposons le noyau subdivisé en une multitude de petites molécules cubiques, et concevons que les lames additionnelles décroissent sur chacune des faces de ce noyau, par une rangée de molécules simples sur tous les angles à la fois. Dans ce cas, comme le montre la figure 20, les rangées soustraites successivement vont en augmentant de longueur à partir de la première, qui n'est formée que d'un seul cube. Il en résulte que la première lame de superposition aura, vers chacun de ses angles, une seule molécule de moins que la face du noyau sur lequel elle repose; que la seconde lame aura deux molécules de moins que la première lame; la troisième, trois molécules de moins que la seconde, et ainsi de suite. La figure 35 représente l'effet initial d'un pareil décroissement. Les nouveaux bords des lames, formés par le décroissement, seront tous alignés sur chaque angle, parallèlement à la diagonale qui lui est opposée; et de plus, d'après la remarque générale que nous avons faite, p. 259, le noyau devant s'accroître comme s'il ne changeait pas de forme dans tous les points que le décroissement n'atteint pas, les lames surajoutées s'étendront, s'il le faut, vers les parties comprises entre leurs bords décroissants, de manière à envelopper toutes ensemble le noyau, sans aucune solution de continuité.

Chacun des huit angles solides du cube sera donc le point de départ de trois décroissements ayant lieu sur les trois plans qui concourent à la formation de cet angle, d'où il suit que les faces produites par les décroissements seront au nombre de vingt-quatre. Mais, parce que les décroissements ont lieu par une simple rangée, il arrive ici ce que nous avons vu dans le cas des décroissements par une rangée sur les bords: c'est que les trois faces qui naissent autour d'un même angle solide sont de niveau; les vingt-quatre faces se réduisent donc à huit; la forme secondaire est un octaèdre, et, par suite de la régularité du noyau, cet octaèdre est lui-même régulier.

Dans ce cas, et en général dans tous ceux qui se rapportent aux décroissements sur les angles, les faces du solide secondaire ne sont plus sillonnées par des stries, comme lorsque les décroissements se font sur les bords : elles sont hérissées d'une multitude de pointes angulaires, formées par les angles extérieurs des molécules, et qui, étant toutes de niveau et échappant à l'œil par leur petitesse infinie, s'offrent encore sous l'aspect de plans lisses et continus.

La figure 29 représente l'assortiment de petits cubes, dont est formée une des faces *smn* de l'octaèdre (fig. 28). Le cube central *o* (fig. 29) répond à l'angle solide du noyau, marqué de la même lettre (fig. 28). Les molécules dont les faces sont traversées diagonalement par les lignes *bc*, *cr*, *rb* (fig. 29), appartiennent aux trois premières lames, placées sur les faces du cube adjacentes à l'angle *o*; celles que traversent diagonalement les lignes *ld*, *dg*, *gl*, appartiennent aux trois lames suivantes. Passé ce terme, les bords décroissants se touchent, de manière que chaque lame prend la figure d'un carré, dont le côté contigu à la face *smn* est *ku*, *xy* ou *hz*; et tout marche alors par des lames de cette même figure, qui vont en décroissant de tous les côtés à la fois jusqu'aux sommets *s*, *m*, *n*, de l'octaèdre, où ces lames se réduisent à un simple cube. La figure 30 représente l'assortiment de cubes, dont se compose l'octaèdre complet.

Si les décroissements qui s'opèrent au-dessus de chaque face du cube n'atteignaient pas leur limite, c'est-à-dire s'ils s'arrêtaient en deçà du terme où les faces qu'ils produisent tendent à se réunir en pointe, il resterait sur le cristal secondaire des faces parallèles à celles du noyau : ce cristal serait *cubo-octaèdre*, en ce qu'il aurait six faces disposées comme celles d'un cube, et huit situées comme celles d'un octaèdre régulier.

Si la loi des décroissements suivait une marche plus rapide, s'il y avait plus d'une rangée soustraite, alors les trois faces qui se formeraient autour d'un même angle solide ne seraient plus sur un même plan ; le solide secondaire aurait vingt-quatre faces distinctes, inclinées vers les angles plans du noyau et de forme trapézoïdale : ce serait un trapézoèdre. Celui de tous les trapézoèdres, qui est donné par la loi la plus simple, résulte d'un décroissement par deux rangées en largeur : c'est celui qu'on voit si communément dans l'analcime, l'amphigène, le grenat, et qui est reproduit par des troncatures tangentes sur toutes les arêtes du dodécaèdre rhomboïdal. Le décroissement pourrait agir éga-

lement par deux, trois, etc., rangées dans le sens de la hauteur. La figure 36 représente l'effet initial d'un décroissement qui aurait lieu sur un angle de parallélipipède par deux rangées en hauteur.

Choisissons maintenant pour forme primitive, le *rhomboèdre*; d'après la symétrie qui est propre à ce genre de forme, les décroissements qui se feront sur les angles culminants seront indépendants de ceux qui pourront avoir lieu sur les *angles latéraux*; nous devons donc considérer à part ces deux sortes de décroissements, comme si chacune d'elles existait seule.

Supposons d'abord que les décroissements se fassent sur les angles plans des sommets et par une seule rangée. Il arrivera ici ce que nous avons vu pour les angles du cube; c'est que les trois décroissements qui auront lieu autour d'un même sommet se nivelleront sur un seul et même plan, qui sera perpendiculaire à l'axe de la pyramide trièdre, c'est-à-dire à l'axe même du rhomboèdre; et comme on doit toujours placer celui-ci de manière que son axe soit vertical, le plan résultant sera horizontal. On aura donc en tout deux faces horizontales, qui ne pourront pas exister seules, mais qui se montreront toujours dans les cristaux de la nature, combinées avec d'autres faces de décroissement. Ces deux faces sont les bases des deux prismes hexagonaux qui font partie du système rhomboédrique, et dans l'un desquels les pans sont produits par un décroissement d'une rangée sur les arêtes latérales du rhomboèdre primitif (voyez ci-dessus p. 259), tandis que dans l'autre, les pans, tournés vers les angles latéraux, comme on le voit fig. 38, proviennent d'un décroissement sur ces mêmes angles. Nous reviendrons dans un moment sur la génération de ce second prisme hexagonal.

Si les décroissements ont lieu sur les angles plans des sommets par deux, trois, etc., rangées en largeur, dès-lors les trois faces produites autour d'un même sommet ne se confondent plus, et le cristal secondaire, composé de six faces, est un rhomboèdre tourné comme le noyau, mais plus obtus que lui (fig. 39, pl. XVI). Ce cas est celui de la variété de fer oligiste, que Haüy a nommé *binaire*, parce qu'elle résulte d'un décroissement par deux rangées.

Si le décroissement avait lieu en hauteur, les faces produites se rejeteraient alors du côté opposé de l'axe, et le rhomboèdre secondaire aurait une position renversée par rapport à celle du noyau.

Tout ce que nous venons de dire des décroissements sur les angles plans supérieurs s'applique comme de soi-même à ceux qui ont lieu sur les angles plans faisant partie des angles solides latéraux. Supposons, par exemple, que le décroissement ait lieu au-dessus de chaque face AE*e*E du noyau (fig. 15), sur l'angle inférieur *e*, et par plus de deux rangées en largeur, par trois, quatre rangées ou davantage, il produira une face qui se relèvera, de manière à aller couper le prolongement de l'axe du noyau du même côté que la face AE*e*E; les six faces semblables, qui naîtront sur les six angles latéraux, composeront donc un rhomboèdre, situé comme le noyau, mais plus aigu que lui. La figure 15 représente une variété de calcaire spathique, produite en vertu d'un décroissement par trois rangées seulement, et à laquelle Haüy a donné le nom de *contrastante*, pour une raison que nous aurons bientôt l'occasion de faire connaître.

A mesure que la marche du décroissement devient moins rapide, la face qu'il engendre se relève davantage ou fait avec l'axe un angle plus aigu, et lorsque le décroissement agit par deux rangées, le plan devient parallèle à l'axe; en sorte que les six faces secondaires sont disposées comme les pans d'un prisme hexagonal. Tel est le mode de génération de celui des deux prismes hexaèdres, dont les faces correspondent à celles du noyau, et que la figure 38 représente circonscrit à celui-ci. Il est facile de voir que quand le décroissement suit cette loi particulière, il y a, à sa naissance, deux arêtes de molécules soustraites sur les arêtes E*e*, *e*E du noyau, et une seule dans la direction de l'arête *e*A' (fig. 39), ou, ce qui revient au même, une arête moléculaire sur les deux premiers bords, et une demi-arête sur le troisième. Par conséquent, un plan que l'on mènerait par les extrémités E, E des arêtes E*e*, *e*E du noyau, et par le milieu de la troisième arête *e*A', serait parallèle à la face secondaire. Or, d'après la nature du rhomboèdre, tout plan ainsi dirigé doit être parallèle à l'axe.

Ainsi, le prisme hexagonal, figure 38, est une limite à la série des rhomboèdres aigus, qui sont en position directe avec le noyau, et le circonscrivent à la manière du contrastant, fig. 15. Au-delà de cette limite, les faces produites se rejettent vers la partie opposée de l'axe, en sorte que le rhomboèdre secondaire est tourné en sens inverse du noyau, comme on le voit figures 40 et 41. Ce cas aura lieu toutes les fois que le nombre qui exprime la loi du décroissement, sera plus petit que le nombre 2,

qui répond au cas des faces verticales; peu importe que ce décroissement soit simple ou mixte, et que son effet soit plus marqué dans le sens de la largeur, ou dans celui de la hauteur. Supposons, par exemple, un décroissement sur l'angle *e*, dont l'expression soit $\frac{3}{2}$, c'est-à-dire un décroissement par trois rangées en largeur et deux en hauteur; le nombre $\frac{3}{2}$ étant plus petit que 2, la face produite se rejettera du côté de l'arête, ou vers la partie inférieure de l'axe, dont elle ira couper le prolongement de ce côté. La figure 40 représente un rhomboèdre de calcaire spathique, produit par le décroissement mixte $\frac{3}{2}$, et auquel Haüy a donné le nom de *mixte* pour cette raison. Ce rhomboèdre a une certaine ressemblance d'aspect avec le contrastant (fig. 15); mais il est plus aigu, et il en diffère encore par la manière dont il se clive : en effet, pour le diviser mécaniquement, il faut placer la lame de l'instrument tranchant sur une des arêtes culminantes, telle que S*n* (fig. 40), en la dirigeant de bas en haut, tandis que pour le contrastant (fig. 15), la lame appuyée de même sur une des arêtes supérieures, doit être dirigée en sens contraire.

Si le décroissement a lieu par une seule rangée, le rhomboèdre secondaire aura les mêmes rapports de position avec le noyau, que la variété *mixte* dont nous venons de parler. Seulement, le nombre 1 qui exprime ainsi la loi, étant plus petit que $\frac{3}{2}$, les faces secondaires feront un angle moins aigu avec l'axe. La figure 41 représente le rhomboèdre calcaire, qui résulte de cette loi très-simple de décroissement, et auquel Haüy a donné le nom d'*inverse* : on verra pourquoi dans un instant. C'est la forme sous laquelle se présente le calcaire quarzifère, anciennement dit *grès cristallisé de Fontainebleau.*

Le rhomboèdre *inverse*, qui est produit par le rhomboèdre primitif en vertu d'un décroissement par une rangée sur les angles latéraux, jouit de la propriété de reproduire à son tour le primitif par un décroissement suivant la même loi, mais agissant cette fois parallèlement aux arêtes culminantes. En d'autres termes, le rhomboèdre primitif est le rhomboèdre *tangent* de l'inverse, comme on le voit fig. 42. Nous avons déja dit ailleurs (p. 135) que l'on pouvait imaginer une série de rhomboèdres

de plus en plus obtus, et successivement tangents l'un à l'autre, par conséquent susceptibles d'être produits, chacun par le précédent, en vertu d'un décroissement par une rangée sur les bords culminants. Cette série peut se continuer indéfiniment dans les deux sens, à partir d'un rhomboèdre quelconque pris pour point de départ, et se compose par conséquent de deux séries partielles : une série ascendante comprenant tous les rhomboèdres plus grands que le générateur, et qui sont enveloppés successivement les uns par les autres ; et une série descendante, formée de tous les rhomboèdres plus petits, et contenus successivement l'un dans l'autre. Dans le calcaire spathique, le rhomboèdre *équiaxe* offre le premier terme de la série ascendante, et les deux premiers termes de la série descendante sont donnés par les rhomboèdres *inverse* et *contrastant*. Par conséquent, l'inverse est le rhomboèdre tangent du contrastant (fig. 43), comme le primitif l'est de l'inverse (fig. 42), et comme l'équiaxe l'est du primitif (fig. 13).

Suivant Haüy, ces quatre rhomboèdres du calcaire, le contrastant, l'inverse, le primitif et l'équiaxe, outre qu'ils sont remarquables par leur filiation dans une même série de formes, construites tangentiellement les unes aux autres, posséderaient encore d'autres propriétés non moins curieuses, auxquelles il a fait allusion, quand il a donné aux deux premiers les noms de *constrastant* et d'*inverse*. Mais il en est de ces propriétés, comme de celle qui a suggéré le nom de métastatique : elles ne sont vraies pour le calcaire, qu'autant que l'on admet les dimensions que Haüy avait cru pouvoir assigner au rhomboèdre fondamental, c'est-à-dire le rapport de $\sqrt{3}$ à $\sqrt{2}$ pour les diagonales de ses faces. Elles n'existent plus dans les rhomboèdres dont il s'agit, si le primitif a pour valeur d'angle 105° 5', au lieu de $104°\frac{1}{2}$.

Quoi qu'il en soit, nous supposerons pour un moment la réalité du rapport $\sqrt{3}$ à $\sqrt{2}$, afin de faire connaître les nouvelles relations qu'il établissait entre les quatre rhomboèdres du calcaire, et qui existent encore au moins d'une manière approchée, si elles ne sont plus rigoureuses. Nous dirons ensuite ce que la théorie nous apprend de plus général, touchant la possibilité de propriétés semblables dans d'autres séries de rhomboèdres.

Dans l'hypothèse où nous nous plaçons maintenant, le rhomboèdre *inverse* a un tel rapport avec le rhomboèdre primitif,

que ses angles plans sont égaux aux angles dièdres du noyau, et que, réciproquement, ses angles dièdres égalent les angles plans du noyau. C'est cette inversion que présentent les deux sortes d'angles du rhomboèdre secondaire à l'égard de ceux du primitif, qui a suggéré le nom d'*inverse*, donné à cette variété par Haüy. Ajoutons que les angles de la coupe principale sont les mêmes dans les deux solides : seulement les deux coupes principales ont des positions renversées, le grand angle de la coupe étant situé au sommet dans le rhomboèdre *primitif*, tandis que cette place est occupée par le petit angle, dans le rhomboèdre secondaire.

La relation précédente entre les coupes principales est tellement liée à l'inversion des angles plans et dièdres dans les deux rhomboèdres, que l'une de ces conditions existant, l'autre en devient une suite nécessaire. De là, et du renversement obligé des deux coupes l'une à l'égard de l'autre, on doit conclure que quand deux rhomboèdres sont inverses, l'un est aigu, et l'autre est obtus, en prenant ces mots dans un sens absolu. Il ne saurait donc y avoir d'inversion entre deux rhomboèdres obtus, pas plus qu'il ne peut en exister entre deux rhomboèdres aigus.

Toujours dans l'hypothèse du rapport fondamental $\sqrt{3}$ à $\sqrt{2}$, le rhomboèdre contrastant offre, à l'égard du rhomboèdre équiaxe, la même inversion d'angles que l'inverse comparé au primitif. Le contrastant est donc l'*inverse* de l'équiaxe; et comme ici l'inversion a lieu entre deux rhomboèdres, dont l'un est très-obtus et l'autre très-aigu, c'est de ce contraste que présentent les deux formes, et qui semblerait écarter l'idée d'une corrélation entre elles, que Haüy a tiré le nom de *contrastant*, qu'il a donné à l'une de ces variétés.

Ce n'est pas tout: si nous revenons à la série générale des rhomboèdres tangents ......*contrastant*, *inverse*, PRIMITIF, *équiaxe*......, dans laquelle, parmi les termes consécutifs, deux seulement (le primitif et l'inverse) satisfont à la condition d'être l'un obtus et l'autre aigu, on verra que l'inversion existe pour ces termes; qu'elle a lieu aussi pour le contrastant et l'équiaxe, qui viennent immédiatement après eux, dans l'un et dans l'autre sens : et si l'on calculait les autres termes de la série, on trouverait que la même propriété subsiste pour deux termes quelconques, pris à égales distances des deux termes moyens. Mais il ne faut pas oublier que ce que nous disons ici n'est vrai que dans l'hypothèse où le rhomboèdre primitif aurait les diagonales de ses faces dans le rapport exact de $\sqrt{3}$ à $\sqrt{2}$.

En effet, Haüy a démontré (*Traité de cristallographie*, t. I, p. 397) que pour qu'un rhomboèdre obtus puisse produire son inverse en vertu d'un décroissement sur l'angle inférieur, il faut que le carré du rapport entre les diagonales des faces du noyau, ou, ce qui revient au même, le carré de l'axe du noyau (la valeur de cet axe étant déterminée à la manière de Mohs ou de Naumann), soit un nombre rationnel. Cette condition étant remplie, il existe toujours deux lois particulières de décroissement, capables de donner un rhomboèdre inverse et qui dépendent des dimensions fondamentales du noyau (1). L'un de ces décroissements produit une face qui se rejette du côté de l'angle plan (décroissement direct de Haüy); l'autre en produit une qui se renverse du côté de l'arête (décroissement inverse).

Comme dernier exemple de décroissement ordinaire sur l'angle inférieur, nous considérerons encore le cas d'un décroissement ayant pour expression $\frac{1}{2}$, ou se faisant par deux rangées en hauteur; il conduit à un résultat remarquable, qui consiste en ce que le rhomboèdre secondaire est absolument semblable au noyau, mais en position diagonale par rapport à lui. En effet, puisque le décroissement retranche deux dimen-

(1) Haüy prend pour données principales, dans le cas du rhomboèdre, les demi-diagonales des faces; l'axe du rhomboèdre a pour expression $\sqrt{9p^2-3g^2}$. Si g représente la demi-diagonale horizontale, et p la demi-diagonale oblique, la perpendiculaire abaissée du sommet d'un angle latéral sur l'axe, ou, ce qui est la même chose, le côté de la projection horizontale du rhomboèdre, est égal à $\frac{2g}{\sqrt{3}}$.

Mohs prend pour unité le côté de la projection horizontale, ou la quantité $\frac{2g}{\sqrt{3}}$, et représentant par a l'axe tout entier, il détermine chaque rhomboèdre en donnant la valeur numérique de a.

Naumann, au contraire, appelle a le demi-axe, et prend pour unité la demi-diagonale g. Appelons α le rapport $\frac{g}{p}$; n, le nombre de rangées soustraites qui exprime la loi du décroissement direct, capable de produire un rhomboèdre inverse, en agissant sur l'angle inférieur; n', la mesure du second décroissement qui agit par renversement sur le même angle. On aura, en général : $n=\frac{\alpha^2+1}{\alpha^2-1}$ et $n'=\frac{5\alpha^2-3}{\alpha^2+3}$.

Si l'on fait, avec Haüy, $\alpha=\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$, on trouve que $n'=1$, et $n=5$.

pas sa limite, il reste six faces parallèles à celles du noyau, et l'on a un polyèdre à trente faces, ayant la figure d'un rhombe, sans être toutes égales entre elles. C'est le triacontaèdre (fig. 45, pl. VI), une des variétés de forme les plus intéressantes parmi celles de la pyrite.

Comme par l'effet initial du décroissement précédent, de celui qui a lieu sur l'angle plan EOI de la base, il y a 3×2 ou 6 arêtes de molécules soustraites sur OE, 3×1 ou 3 arêtes soustraites sur OI, et 2 arêtes seulement soustraites en hauteur sur OO', il s'ensuit que c'est absolument la même chose de dire avec Haüy, que le décroissement se fait par trois rangées en largeur et deux en hauteur de molécules *doubles*, ou de dire plus simplement, qu'il a lieu sur l'angle O par une seule rangée de molécules multiples, égales à $6 \times 3 \times 2$ molécules simples et semblables au petit parallélipipède que le décroissement retranche à son origine sur l'angle solide du noyau (*voyez* fig. 37 et 44). Les décroissements intermédiaires peuvent donc se ramener aux décroissements ordinaires, et au plus simple de tous, à celui qui a lieu par une seule rangée de molécules soustraites, pourvu que la molécule soustraite soit en général un multiple de la molécule simple, et que la valeur particulière de ce multiple puisse varier d'un décroissement à un autre. A l'aide de cette remarque, on pourra réduire tous les décroissements sur les angles à une seule espèce de décroissement, savoir : à un décroissement par une rangée de molécules multiples, dont la valeur générale sera égale à $m \times n \times p$ molécules simples. Cette observation, jointe à celle que nous avons faite ci-dessus, à propos des décroissements sur les bords (p. 256), pourra servir à simplifier la théorie de Haüy, en débarrassant son exposé de ces distinctions inutiles de décroissements ordinaires et de décroissements intermédiaires, de décroissements en largeur ou en hauteur, de décroissements simples ou mixtes. Nous reviendrons bientôt sur cette nouvelle manière d'envisager la théorie des décroissements, qui n'en altère aucunement le fond, et n'en modifie que l'expression ou la forme apparente. Mais auparavant reprenons les choses au point de vue de Haüy, pour achever de faire connaître toutes les faces de sa doctrine.

Les décroissements intermédiaires sont étroitement liés aux décroissements ordinaires sur les angles, et sauf le cas où une face secondaire est produite par la soustraction d'une seule ran-

: molécules simples, on peut dire que ces décroissements iennent nécessairement dans la production de toute face, istant qu'elle se prolonge autour d'un angle solide, au-des diverses faces qui entrent dans la composition de cet Nous avons vu que, dans le cas des décroissements sur tes, lorsque le décroissement avait lieu par deux rangées rantage, et que la face résultante s'étendait des deux côtés rd qui avait servi de ligne de départ au décroissement, e il arrive à la face pq IO, dans le dodécaèdre pentago-. 25, on pouvait considérer celle-ci comme le résultat eul décroissement par deux rangées en largeur, ayant encé à agir au-dessus de la base, et dont l'effet se se-nsuite prolongé en sens contraire; ou bien, la consi-comme le résultat de deux décroissements différents, rincipal, ayant lieu au-dessus de la base EOI par deux es en largeur, l'autre purement auxiliaire du premier, lieu sur la face adjacente IOO' par deux rangées en hau-

1 est de même des décroissements sur les angles, quand ils sent un plan unique qui se prolonge au-dessus des faces es de celle sur laquelle le décroissement principal a agi. On ians doute se borner à la considération de celui-ci, puis-détermine à lui seul la direction du plan secondaire; mais, r voulait achever la construction du cristal, on reconnaî-sans peine que la portion du prolongement qui regarde ine des faces adjacentes est due en réalité à un décroisse-*auxiliaire*, que subissent les lames appliquées sur cette face, vient continuer l'effet du premier. Ainsi, quand un plan a oduit sur un angle trièdre, en vertu d'un décroissement pris naissance sur une face, et qui s'est étendu ensuite au-i des autres faces de l'angle, on peut toujours y voir le ré-de trois décroissements conjugués, qui ont contribué à la tion de ce plan unique par des actions conspirantes. Or, ii des trois décroissements que l'on considère comme prin-est ordinaire, et qu'il ait lieu par une rangée, les deux au-:ront pareillement ordinaires et se feront suivant la même i le décroissement principal, étant toujours supposé ordi-a lieu par deux rangées ou davantage, les deux décrois-its qui lui viennent en aide sont toujours des décroisse-i intermédiaires. Enfin, il y a un troisième cas possible: :elui où les trois décroissements qui agissent autour d'un

même angle solide sont tous intermédiaires. Tel serait le cas d'une face située comme *cpn*, fig. 44.

On voit que les décroissements intermédiaires doivent se présenter fréquemment dans les cristaux qui proviennent de modifications sur les angles, et que, sauf le cas unique d'un décroissement par une seule rangée de molécules simples, leur considération intervient toujours, dès l'instant qu'on veut tenir compte des décroissements auxiliaires, qui combinent leurs actions autour d'un même angle solide. Mais il arrive souvent que l'un de ces décroissements conjugués est ordinaire, et dans ce cas, Haüy le choisit toujours pour décroissement principal, et s'en tient à celui-là, passant les autres décroissements sous silence. C'est seulement lorsque les trois décroissements qui agissent de concert autour d'un même angle sont tous intermédiaires, que Haüy est forcé de prendre un pareil décroissement pour le principal, et dans ce cas il choisit toujours le plus simple, ne tenant aucun compte des deux autres, qu'il regarde comme auxiliaires.

Nous venons de voir que, quand plusieurs décroissements agissant autour d'un même angle solide, ont pour résultat commun un plan unique, Haüy choisit l'un d'eux pour décroissement principal, et en déduit un mode particulier de génération pour le plan dont il s'agit. Mais, comme le choix du décroissement principal est arbitraire, il s'ensuit que la génération du plan est susceptible d'autant d'expressions différentes qu'il entre de faces dans la composition du cristal. C'est un inconvénient assez grave, qui vient de cette manière de rapporter l'effet du décroissement à telle ou telle face, à tel ou tel angle plan, que l'on choisit à volonté, au lieu de considérer l'effet absolu produit autour de l'angle solide sur toutes les faces prises ensemble. Cet inconvénient se révèle, lorsqu'on étudie le système de notation adopté par Haüy, et qui consiste, comme on le verra tout-à-l'heure, à donner pour signe à chaque plan secondaire une formule représentant la loi du décroissement qui le produirait, en agissant sur une certaine face du noyau : car, à l'exception du cas où le décroissement se fait par une seule rangée de molécules simples, la nouvelle face peut être exprimée de plusieurs manières très-différentes.

En nous reportant à la figure 44, où *cpn* représente la direction d'un plan secondaire, on voit que sa génération résulte, ou d'un décroissement par deux rangées en hauteur de molécules triples sur la face EOI, ou d'un décroissement par trois rangées

eur de molécules doubles sur la face EOA', ou enfin :roissement par une seule rangée de molécules sextuples ce IOA'. Selon que l'on s'arrêtera à l'un ou à l'autre de décroissements, on obtiendra une expression différente résenter le même résultat, et, par conséquent, la notace résultat offrira en soi quelque chose d'arbitraire.
eut parer à cet inconvénient, en ramenant toutes ces ons à une seule, qui représentera alors, non plus l'effet une face particulière, mais l'effet absolu produit autour le solide, et qui en définitive est un plan unique, dont s parties doivent offrir la même texture moléculaire. Si les :croissements qui naissent autour de l'angle solide O produisent en commun un seul plan, c'est que chacun etranche sur les lames additionnelles les mêmes nombres lcules dans la direction des arêtes de l'angle O, savoir: .le dans le sens de OE; deux dans le sens de OA', et trois sens de OI. Par conséquent, ces trois décroissements ıt avoir une seule et même désignation, consistant dans tion pure et simple de ces nombres de molécules, sousgalement par chacun d'eux à leur origine. C'est ce qu'ont mpris les cristallographes qui ont adopté la théorie des sements; ils ont tous été naturellement conduits à modans le sens que nous indiquons ici, les expressions des décroissement, en ce qui concerne les modifications sur les (MM. Brooke et Lévy). Il suffit donc, pour faire conrigoureusement la direction d'une face secondaire, propar une modification sur l'angle O dans les conditions entes, de retrancher une dimension moléculaire sur l'arête ıux sur OA', trois sur OI; puis, par les extrémités des seg- Oc, Op, On, de mener le plan cpn, qui sera évidemment le à la face produite par le décroissement. Celle-ci seuletait tangente au noyau, tandis que le plan par lequel on place est une véritable section. Mais cette transformation du décroissement en une troncature a l'avantage de monlien qui existe entre la théorie des décroissements, telle ıüy l'a formulée, et la méthode des troncatures, qu'on lui ue souvent, parce qu'elle ne fait qu'en reproduire les résous une forme plus simple.
este, les nouveaux signes par lesquels nous nous proposons ıplacer quelques-uns de ceux dont Haüy faisait habituelt usage, n'étaient pas inconnus à cet habile minéralogiste,

et il avait fini par s'en servir lui-même dans certains cas, leur donnant alors le nom de *signes techniques*, pour les distinguer des autres signes qu'il appelait *signes théoriques* (1), et qui donnent immédiatement la mesure du décroissement, relativement à l'une des faces primitives.

§ 13. *De la notation des faces, et des formes secondaires.*

Haüy a eu l'idée de traduire, dans une langue abrégée, analogue à celle de l'algèbre, l'énoncé des diverses lois qui déterminent les cristaux secondaires, et de composer ainsi des espèces de formules représentatives de ces mêmes cristaux, qui rappellent tout-à-fait les formules atomiques de la chimie moderne. Il lui a suffi pour cela de désigner par des lettres les angles et les arêtes du noyau, en ayant soin de noter de la même manière les parties qui sont identiques, et de faire accompagner ces lettres de chiffres, en forme d'indices, exprimant les lois des décroissements que subissent tels angles ou telles arêtes. Au moyen de cette attention, et de quelques autres qui concernent la manière de poser les chiffres, en haut ou en bas, à droite ou à gauche, afin de marquer en même temps le sens dans lequel agit le décroissement qu'il considère comme principal, Haüy est parvenu à créer des signes, dont l'intelligence est facile à saisir, qui sont comme une image théorique des cristaux secondaires, et qui renferment toutes les données nécessaires pour tracer une figure exacte de ces cristaux, et calculer toutes les inclinaisons de leurs faces. Nous allons faire connaître, en peu de mots, les règles qu'il a imaginées, et les simplifications que l'on peut apporter à sa méthode, en quelques points seulement et sans en changer aucunement l'esprit.

Supposons que la figure 47 représente un parallélipipède quelconque, dont les faces aient des angles de différentes mesures, et qui remplisse la fonction de forme primitive dans une espèce minérale. Haüy adopte les voyelles pour désigner en général les angles solides, et il place les quatre premières A, E, I, O aux quatre angles de la base supérieure, en suivant l'ordre de l'écriture ordinaire; il adopte les consonnes pour représenter en général les arêtes, plaçant les premières B, C, D, F, G, H sur les

(1) Voyez dans le second volume de son *Traité de Cristallographie*, p. 211, le chapitre concernant l'octaèdre, qu'il m'avait chargé de rédiger pour cet ouvrage; et aussi dans la seconde édition de son *Traité de Minéralogie*, l'article *Chaux fluatée*.

lieux des côtés de la base supérieure et du pan situé en ant; et enfin, sur les milieux de cette même base et des deux ns antérieurs, il place les trois lettres P, M, T, qui sont les tiales des syllabes dont se compose le mot *primitif.* A l'excep-n de ces trois consonnes, qui, sans aucune addition, représen-it dans les formes secondaires des faces parallèles à celles du yau, chaque voyelle ou chaque consonne est accompagnée in chiffre, dont la position et la valeur indiquent le sens et la du décroissement qu'a subi l'angle ou le bord correspondant. aque lettre comprise dans le signe d'un cristal est censée se iéter, avec le chiffre qui l'accompagne, sur tous les angles ou is les bords identiques avec celui qui est marqué de cette tre sur la figure. Il est bien entendu que si le noyau est d'une me plus régulière que le parallélipipède obliquangle repré-ité fig. 47, la notation du noyau en sera plus simple, en ce e les angles solides, ou les bords, qui seront devenus égaux, rront être marqués de la même lettre. La fig. 48 représente la tation du prisme, lorsqu'on le suppose droit et rectangulaire. ns le cas du cube, toutes les faces, étant égales, porteront une le et même lettre P; tous les angles seront marqués de la tre A; toutes les arêtes de la lettre B. (Voyez fig. 1, pl. IV.)

Les modifications ou décroissements peuvent avoir lieu sur arêtes, ou sur les angles. Supposons d'abord qu'il s'agisse du emier cas, et qu'un décroissement ait lieu sur l'arête B, fig. 48, agissant sur la base par *m* rangées en largeur, et *n* rangées en uteur. Ce décroissement pourra être exprimé par le signe $\overset{m}{\underset{n}{B}}$, plus simplement par $B^{\frac{m}{n}}$. On voit que ce signe indique que r l'effet du décroissement il y a *m* molécules soustraites sur bord C, et *n* dans la direction de G, en sorte que si l'on nd le segment A*m* égal à *m* largeurs de molécules, et le seg-nt A*p* égal à *n* hauteurs moléculaires, le plan *mpqn*, paral-e à B, sera la face de décroissement dont il s'agit, transportée rallèlement à elle-même et devenue une face de troncature. signe $B^{\frac{m}{n}}$ n'est que l'abrégé du signe (C^m G^n), qui serait l'ex-ssion la plus naturelle de cette troncature.

Si le décroissement a lieu sur une arète verticale G, fig. 49, iiy place le signe à la droite ou à la gauche de la lettre G, vant que l'effet du décroissement en largeur a lieu dans un s ou dans un autre. Ainsi, le signe ${}^{\frac{3}{3}}H$, se rapportant à la

figure 48, désigne un décroissement qui naît à gauche de H, sur le pan M, et qui a lieu par 3 rangées en largeur, et 2 en hauteur. Le signe $H^{\frac{3}{2}}$ désignerait au contraire un décroissement suivant la même loi, qui aurait lieu à droite de H, sur le pan T. En général, dans le système de notation adopté par Haüy, selon que le chiffre est placé au-dessous ou au-dessus de la lettre qu'il accompagne, ou bien à droite ou à gauche de cette lettre, il indique que le décroissement descend ou monte, ou qu'il marche dans le sens latéral à droite ou à gauche, relativement à l'angle ou au bord qui porte la lettre.

Supposons maintenant qu'il s'agisse d'une modification sur un angle; et d'abord, imaginons qu'il se fasse, sur la base P et sur l'angle A à gauche, fig. 48, un décroissement ordinaire, par *m* rangées en largeur, et *n* rangées en hauteur. Si l'on prend A*t* égal à *n* hauteurs de molécules, A*r* et A*s* égales à *m* longueurs et *m* largeurs de molécules, et qu'on mène le plan *rst*, cette troncature étant parallèle à la face de décroissement, pourra lui être substituée. Or, cette troncature a pour expression générale A ($B^m C^m G^n$), c'est-à-dire que nous pouvons la représenter par le signe A de l'angle solide, accompagné d'une parenthèse, contenant l'indication des sections faites sur les arêtes, comme nous l'avons déjà fait en exposant la méthode des troncatures (voyez page 102). Mais, parce que dans le cas particulier d'un décroissement ordinaire, les indices numériques se réduisent à deux, *m* et *n*, le signe précédent est susceptible d'être abrégé, comme celui des troncatures sur les arêtes, et de prendre une forme analogue, savoir : $A^{\frac{m}{n}}$. Telle est, dans le système de notation de Haüy, l'expression la plus simple et la plus générale des décroissements ordinaires sur les angles.

Concevons maintenant que le décroissement sur l'angle A (fig. 49) soit un décroissement intermédiaire, et que par l'effet de ce décroissement il y ait *m* molécules soustraites dans le sens de B, *n* dans le sens de C, et *p* dans le sens de la hauteur G; si l'on prend A*r* égale à *m* dimensions correspondantes de molécules, A*s* à *n* dimensions en largeur, et A*t* à *p* hauteurs de molécules, la troncature *rst* marquera la direction du plan secondaire, et il suffira, pour déterminer rigoureusement cette direction, d'indiquer comme à l'ordinaire les nombres entiers *m*, *n*, *p* qui expriment les valeurs relatives des segments A*r*, A*s*, A*t*. Le plan *rst* aura donc pour signe A ($B^m C^n G^p$).

Ce signe n'est point susceptible d'abréviation, lorsque les indices m, n, p ont pour valeur des nombres premiers entre eux; il exprime d'ailleurs, d'une manière très-simple et très-naturelle, la direction de la face secondaire, puisqu'il fait connaître dans quels rapports cette face coupe les arêtes de l'angle solide, et par conséquent aussi les axes du noyau, si l'on prend pour axes les droites qui vont du centre au milieu des faces. C'est donc ce signe qu'il convient d'adopter pour représenter les décroissements intermédiaires, c'est-à-dire les décroissements sur les angles, considérés dans leur plus grande généralité.

Le signe A $(B^m C^n G^p)$ revient à celui que Haüy, vers la fin de sa carrière, a désigné sous le nom de *signe technique*. Mais ce n'est point la forme sous laquelle il avait cru d'abord devoir traduire les lois des décroissements intermédiaires; et, bien que les signes théoriques dont il a fait usage doivent être abandonnés, pour les raisons que nous avons indiquées plus haut, nous dirons cependant comment il les formait, afin de faciliter l'intelligence de ses ouvrages aux personnes qui voudraient les étudier.

Soit AA', fig. 44, un noyau cubique. Supposons que sur la base supérieure et à partir de l'angle solide O, il se fasse un décroissement par deux rangées en hauteur de molécules triples, en sorte que la ligne *cn* marque la direction du décroissement, et que la section *cnp* indique les nombres de dimensions de molécules soustraites sur les côtés de l'angle; ce décroissement intermédiaire pourra être exprimé par le signe $\left(\overset{\frac{1}{2}}{O}\,B^1\,\overset{''}{B}{}^3\right)$, en admettant que les trois côtés OE, OA', OI, égaux entre eux, soient représentés par les lettres B, B', B". Ainsi, dans le signe précédent, la parenthèse indique d'abord que le décroissement est intermédiaire; la lettre $\overset{\frac{1}{2}}{O}$ exprime ensuite que ce décroissement a lieu, par deux rangées en hauteur, au-dessus de l'angle O, et qu'il se rapporte par conséquent à la base EOIA; enfin $B^1\overset{''}{B}{}^3$ font connaître que pour une arête de molécule soustraite le long du bord B, il y en a trois de soustraites sur le bord B". Il est d'ailleurs évident que la portion $\overset{\frac{1}{2}}{O}$ du signe précédent revient à dire qu'il y a en même temps deux arêtes soustraites sur $\overset{\prime}{B}$. Donc ce signe est l'équivalent du signe O $(B^1 B'^2 B''^3)$, par lequel nous nous proposons de le remplacer. En outre, il est facile de voir

que le signe théorique $\left(\overset{\frac{1}{2}}{O} B^1 B''^3\right)$ n'exprime qu'un effet du décroissement, purement relatif à la face supérieure de l'angle solide O. Si le plan secondaire, qui se forme sur cet angle, se prolongeait au-dessus des faces latérales, on pourrait le regarder comme produit par l'un ou l'autre des décroissements auxiliaires qui se combinent avec le premier, et qui se rapportent à ces faces, et alors ce plan secondaire changerait nécessairement d'expression. Relativement au plan I O A'; il serait *représenté par* le signe $(O^1 B^{2'} B''^3)$, et par rapport au plan E O A', son expression deviendrait $\left(\frac{1}{3} O B^1 B'^2\right)$.

Ainsi, d'après ce système de notation, le même plan secondaire peut avoir trois signes différents $\left(\overset{\frac{1}{2}}{O} B^1 B''^3\right)$, $(O^1 B'^2 B''^3)$, $\left(\frac{1}{2} O B^1 B'^2\right)$, entre lesquels on est libre de choisir. Mais, parce que ce choix a quelque chose d'arbitraire, et que chacun de ces signes exprime au fond la même chose que la formule de troncature O $(B^1 B'^2 B''^3)$, c'est évidemment cette dernière qu'il faut leur préférer.

En résumé, on voit que la méthode de notation de Haüy, avec les simplifications qu'elle comporte, se réduit à ceci. Il y a deux classes principales de modifications : les modifications sur les arêtes, et les modifications sur les angles. Chacune de ces classes de modifications a un signe particulier, qui n'est en réalité que le signe d'une troncature faite sur le noyau, parallèlement à la face modifiante.

Si B, C, G représentant les arêtes d'un angle solide du noyau, fig. 49, un décroissement a lieu sur l'arête B, par *m* molécules dans le sens de C, et par *n* molécules dans le sens de G, ce décroissement pourra être exprimé par le signe B $(C^m G^n)$, ou plus simplement par $B^{\frac{m}{n}}$.

Si une modification a lieu sur l'angle solide A (fig. 50), elle aura pour expression générale A $(B^m C^n G^p)$. Ce dernier signe comprend en lui-même les deux cas que considérait séparément Haüy, sous les noms de *décroissement ordinaire sur les angles*, et de *décroissement intermédiaire*.

Le décroissement est intermédiaire, quand les trois indices m, n, p sont inégaux, et alors le signe conserve la forme générale A $(B^m C^n G^p)$; il est ordinaire, quand deux des indices sont

et, dans ce cas, le signe peut prendre une forme plus , analogue au signe des décroissements sur les bords. Si par exemple, A ($B^m C^n G^p$), on pourra substituer à ce signe ıule équivalente $\frac{n}{m}A$, qui veut dire que la face est proıar un décroissement ordinaire $\frac{n}{m}$ sur le pan à gauche ıgle A.

valeurs relatives des indices m, n, p sont toujours des tés rationnelles, et peuvent être mises sous la forme de nomıtiers, qui sont généralement très-simples. Il résulte de la des décroissements, que ces nombres doivent être ena rationnalité des indices est donc incontestable, puisque rie des décroissements n'est que la traduction même des : clivage, en ce qui concerne les formes secondaires. à la simplicité des nombres qui en expriment les valeurs, ulement un résultat de l'expérience, établi par de noms observations, et qui dérive sans doute des lois méss de la structure cristalline : il vient probablement de les décroissements simples sont plus favorables que les dénents compliqués, à la stabilité de l'équilibre moléculaire. néthode de notation qui précède, ne laisse rien à désirer s rapports de la simplicité et de la généralité. On sait qu'à le rangées de molécules soustractives, de forme prismatiıi toujours existent parmi les résultats du clivage, on peut oir des décroissements sur les faces de toute forme primielconque. Si le noyau était un octaèdre, au lieu d'être un les modifications, qui dans ce cas auraient lieu sur les s'exprimeraient comme celles des noyaux prismatiques, signe de la forme $B^{\frac{m}{n}}$. Mais les angles solides étant forr quatre arêtes au lieu de trois, le signe d'une modifica- : un angle prendrait la forme générale A ($B^m C^n G^p F^q$). trois points suffisent pour déterminer un plan, il est clair ourrait se borner à indiquer trois des indices m, n, p, q ; un quelconque des quatre peut-il se déduire des trois upposés connus (1). Mais il vaut mieux, pour la commo-

'on suppose que les deux indices m et n d'une part, et les deux in-, q de l'autre, se rapportent à celles des quatre arêtes qui sont oppo- : elles sur l'angle solide, on aura entre ces quatre quantités, la relarale :

$$\frac{1}{m}+\frac{1}{n}=\frac{1}{p}+\frac{1}{q}.$$

le *Traité de Cristallographie* de Haüy, 2e vol., article de l'octaèdre,

dité des calculs et la symétrie des formules, donner les quatre indices à la fois.

Nous n'ajouterons plus qu'un mot relativement au sujet qui vient de nous occuper, c'est que la manière de représenter une arête par une seule lettre placée en son milieu, comme le fait *Haüy*, est convenable en général, mais peut devenir insuffisante dans certains cas, dans ceux, par exemple, où la symétrie conduit à des formes hémiédriques, et où il est nécessaire d'indiquer les différences qui existent, soit entre les deux extrémités d'une même arête, soit entre les deux côtés qu'elle tourne vers les faces qui lui sont adjacentes. Consultez sur ce point ce que nous avons dit plus haut, à l'occasion du cube de la pyrite, et de quelques autres formes à modifications hémiédriques, page 123 et suivantes.

§ 14. *Nouvel exposé plus simple de la théorie des décroissements.*

Nous venons de voir comment, à l'aide de soustractions de rangées moléculaires, dont les éléments composants ont toujours la forme du parallélipipède, Haüy rend compte de toutes les modifications secondaires qui peuvent se produire autour d'un noyau primitif. Il emploie constamment pour molécules soustractives, l'élément le plus simple possible, et, sauf le cas des décroissements intermédiaires, pour lequel il est forcé de prendre des molécules multiples de la molécule intégrante, ses rangées de molécules se composent toujours de molécules simples, comme on a pu le voir pour les décroissements ordinaires sur les bords ou sur les angles. Mais dans ce dernier cas il lui faut compter, en passant d'un décroissement à l'autre, un nombre plus ou moins grand de ces rangées de molécules simples, tant en largeur qu'en hauteur, pour avoir par leur soustraction la première marche du gradin secondaire. On voit donc que, la nature des molécules et des rangées demeurant la même, la différence entre les décroissements porte uniquement sur le nombre des rangées soustraites. Mais le contraire pourrait avoir lieu sans qu'il y eût rien de changé dans la structure; et tous les décroissements, de quelque espèce qu'ils soient, pourraient être considérés comme se faisant toujours par *une seule* rangée de molécules, si la molécule soustractive était regardée comme pouvant varier d'un décroissement à l'autre, c'est-à-dire si elle était généralement un assemblage de molécules simples, tout aussi bien dans le cas

des décroissements ordinaires que dans celui des décroissements intermédiaires. Il ne faut qu'étendre à tous les décroissements, quelle que soit leur direction, cette idée de molécules intégrantes, associées entre elles par petits groupes, que Haüy s'est vu obligé d'admettre, pour expliquer les décroissements intermédiaires ; et alors, le nombre des rangées soustraites se trouvant toujours réduit à un, la variation ne portera plus que sur le multiple, qui dans chaque décroissement particulier, constituera la molécule soustractive. Or, ce multiple aura précisément pour facteurs les indices mêmes de la face secondaire, considérée comme plan de troncature. C'est ce que les observations suivantes feront aisément comprendre.

Les figures 25, 27 et 31 représentent, suivant Haüy, un décroissement sur les bords par deux rangées en largeur de molécules simples ; mais il est évident, à la seule inspection de ces figures, que cela revient à un décroissement par une simple rangée de molécules doubles, c'est-à-dire de molécules groupées deux à deux dans le sens de la largeur, de molécules soustractives ayant une largeur ou profondeur double de celle des véritables molécules. La figure 34 représentera de même à volonté, ou, comme le veut Haüy, un décroissement mixte par deux rangées en largeur et trois rangées en hauteur de molécules simples, ou, ce qui est la même chose, un décroissement par une seule rangée de molécules sextuples, chaque molécule multiple ayant deux molécules simples en largeur ou profondeur, et trois molécules en hauteur. Il en sera de même des décroissements ordinaires sur les angles : le décroissement représenté par la fig. 36, et qui est pour Haüy un décroissement par deux rangées en hauteur de molécules simples, équivaut réellement à un décroissement par une rangée de molécules doubles, les molécules simples étant jointes deux à deux dans le sens de la hauteur.

Donc, en général, un décroissement sur une arête $B^{\frac{m}{n}}$, ou un décroissement ordinaire sur un angle $A^{\frac{m}{n}}$, peut toujours être considéré comme ayant lieu par une seule rangée de molécules soustractives, équivalentes à $m \times n$ molécules simples. Nous avons vu précédemment, page 272, qu'un décroissement intermédiaire quelconque $A(B^m C^n G^p)$ pouvait aussi être considéré généralement comme ayant lieu par une seule rangée de molécules multiples, égales à $m \times n \times p$ molécules simples. Le point de vue auquel nous cherchons à ramener les décroissements a

donc toute la généralité désirable; et il va nous fournir les moyens de simplifier la théorie des décroissements, en supprimant la plupart des distinctions et des dénominations particulières, imaginées par Haüy, distinctions et dénominations qui compliquent sans nécessité l'exposé de la théorie, et surchargent inutilement la nomenclature. Voici donc les termes plus simples, auxquels il nous semble qu'on peut la réduire.

I. Toutes les modifications d'une forme primitive se réduisent à deux sortes : *modifications sur les arêtes* et *modifications sur les angles*. Les unes, comme les autres, consistent dans un décroissement *par une seule rangée* de molécules soustractives, qui sont généralement des multiples de la molécule simple. La seule différence entre les deux sortes de modifications, est que, pour les rangées soustraites sur les bords, les molécules soustractives se placent à la suite les unes des autres en s'apposant par leurs faces, tandis que dans les rangées tournées vers les angles, les molécules soustractives se suivent en se tenant par leurs arêtes.

II. Dans toute modification sur une arête, telle que *mnpq*, fig. 48, la molécule soustractive est un multiple de la forme $m \times n$; et le groupe moléculaire est tellement constitué, qu'il comprend *m* molécules simples en largeur ou dans le sens de l'arête C, *n* en hauteur ou dans le sens de G, et n'en offre qu'une seule dans le sens transversal, c'est-à-dire parallèlement au bord B qui subit le décroissement. La molécule soustractive est donc indiquée par le signe $C^m G^n$, et le décroissement lui-même peut être désigné très-simplement par $B^{\frac{m}{n}}$ (1). Pour se représenter facilement le plan secondaire avec la texture moléculaire qui lui est propre, il suffira de retrancher du noyau lui-même, le long du bord B, une rangée de molécules soustractives, ce qui déterminera un coin rentrant, semblable à une marche d'escalier ; puis d'imaginer que l'escalier se continue uniformément dans des couches surajoutées au noyau, tant au-dessus qu'au-dessous de la première marche ainsi formée.

III. Dans toute modification sur un angle, telle que *rst*, fig. 48

(1) Si, dans le signe général $B^{\frac{m}{n}}$, *m* et *n* sont tous deux plus grands que l'unité, on a le décroissement mixte de Haüy ; si *n* est égal à 1, *m* étant un nombre entier plus grand, on a ce qu'il appelle un décroissement en largeur ; si le contraire a lieu, le décroissement se fait en hauteur. Enfin, si *m* et *n* sont tous deux égaux à 1, on a le cas le moins compliqué possible, celui d'un décroissement par une seule rangée de molécules simples.

et 49, la molécule soustractive est un multiple de la forme $m \times n \times p$; et ce multiple a des dimensions telles qu'il comprend m molécules simples dans le sens de l'arête B, n molécules dans le sens de C, et p molécules dans le sens de G. La molécule soustractive est donc donnée par le signe $(B^m C^n G^p)$, et le décroissement lui-même est exprimé par le même symbole général, ordinairement précédé de la lettre qui marque l'angle sur lequel la modification a pris naissance. Si, à partir du sommet A, on retranche du noyau les molécules nécessaires pour constituer la molécule soustractive $m \times n \times p$, on déterminera ainsi la formation d'une petite cavité angulaire, égale en volume à cette molécule, et entourée de trois pointes saillantes de même forme, qui aboutiront à un même plan. Ce plan étant supposé prolongé de tous côtés, pour servir de limite à la matière enveloppante du noyau, au-dessus de l'angle A, imaginez que l'on continue à la surface de cette matière cette alternative de creux et de saillies angulaires, que la première soustraction avait commencé à produire, vous aurez une texture moléculaire semblable à celles que représentent les figures 30, 36 et 37, c'est-à-dire une face qui sera plane, quant à l'ensemble de ses parties, mais toute hérissée d'angles alternativement saillants et rentrants.

Si dans le signe général $A\,(B^m C^n G^p)$ deux des indices m, n, p, deviennent égaux, en sorte que l'on ait, par exemple, $n = p$, le signe $A\,(B^m C^n G^p)$ pourra s'écrire sous la forme plus simple $A^{\frac{n}{m}}$; dans ce cas particulier, une des intersections du plan secondaire avec les faces du noyau sera parallèle à une diagonale (1).

Si les trois indices sont inégaux, le signe $A\,(B^m C^n G^p)$ ne subit aucun changement ; dans ce cas général, qui embrasse nécessairement comme limites ou cas particuliers, tous les précédents (y compris même celui d'un décroissement parallèle à une arête B, que l'on obtiendrait en faisant m infini), toutes les intersections du plan secondaire avec les faces primitives sont situées de biais, c'est-à-dire ont des directions *intermédiaires* entre celles des arêtes et celles des diagonales (2).

(1) C'est le cas d'un décroissement ordinaire sur les angles, lequel est susceptible de présenter les modifications secondaires, que Haüy nomme décroissement en largeur, en hauteur, ou mixte, suivant les relations différentes que les indices m et n peuvent avoir entre eux et avec l'unité.

(2) C'est le cas des décroissements intermédiaires de Haüy, et le signe $A\,(B^m C^n G^p)$ revient à celui qu'il adopte, et qui peut se déduire du premier de la manière suivante. Supposons que deux des indices m, n, p aient des facteurs

§ 15. *Généralité de la théorie. — Noyaux hypothétiques.*

La théorie des décroissements ne s'applique pas seulement aux noyaux de forme prismatique : Haüy en a fait des applications nombreuses à tous les autres noyaux que l'observation lui avait fournis, savoir : au tétraèdre régulier, à l'octaèdre, au prisme hexagonal et au dodécaèdre rhomboïdal. Il suffit, pour concevoir cette extension de la théorie, de se rappeler que, quelle que soit la forme des molécules intégrantes, il arrive toujours qu'en les prenant par petits groupes de deux, quatre ou six, elles composent des parallélipipèdes ; en sorte que les lames cristallines peuvent toujours être considérées comme formées d'éléments parallélipipédiques juxta-posés, qui sont les molécules soustractives.

Mais ce n'est pas tout encore : Haüy a fait voir qu'il était toujours possible de substituer hypothétiquement au vrai noyau une forme secondaire quelconque ; c'est-à-dire que, si parmi toutes les formes secondaires, qui dérivent d'une même forme primitive, on en choisit une à volonté, pour la substituer comme *noyau hypothétique* à la véritable forme primitive, et si, de plus, on suppose que ce nouveau type soit un assemblage de petits solides moléculaires, semblables à ceux qu'on obtiendrait en le divisant géométriquement par des plans parallèles à ses différentes faces, on pourra en faire dériver, par des lois *simples* et régulières de décroissements, toutes les autres formes, y compris le véritable noyau, qui devient secondaire à son tour par rapport au noyau supposé. Cette proposition, dont Haüy a prouvé la vérité dans une multitude de cas, revient à ce que nous avons dit ailleurs (p. 116) de la dérivation mutuelle des formes, qui font partie d'un même système cristallin (1). Nous nous bornerons à en citer un seul exemple, tiré des formes du calcaire spathique.

communs, et faisons par exemple $n = \alpha . n'$ et $p = \alpha . p'$, α étant le plus grand diviseur commun de n et de p. Le signe A ($B^m C^n G^p$) sera équivalent à A ($B^{\frac{m}{\alpha}} C^{n'} G^{p'}$), que Haüy met sous la forme ($A^{\frac{m}{\alpha}} C^{n'} G^{p'}$). Cette manière d'envisager le décroissement le conduit encore ici à cette distinction de décroissements en largeur, de décroissements en hauteur et de décroissements mixtes, à laquelle on échappe par l'adoption du premier signe, en même temps qu'on évite l'arbitraire que comporte le point de vue particulier du célèbre cristallographe. Voyez p. 274.

(1) Voyez l'Appendice, où nous donnons de cette proposition une démonstration très-simple et très-générale.

Supposons que l'on prenne pour noyau hypothétique, le rhomboèdre aigu, auquel Haüy a donné le nom d'inverse, et imaginons qu'il subisse un décroissement par une rangée sur ses arêtes culminantes, fig. 42, nous aurons pour forme dérivée un rhomboèdre semblable au véritable noyau, c'est-à-dire un rhomboèdre obtus de 105° 5'. Ainsi, dans l'espèce du calcaire spathique, le rhomboèdre de clivage est le rhomboèdre tangent ou équiaxe du rhomboèdre aigu dit *inverse*. Nous avions déjà mentionné ce fait, dans le développement de la théorie, p. 266.

Concevons maintenant que le même rhomboèdre inverse subisse un décroissement par deux rangées sur les angles aa', qui forment les sommets, il reproduira l'équiaxe, fig. 50. Si le décroissement se faisait par une seule rangée sur les angles latéraux $y, u, t\ldots$, il en résulterait un rhomboèdre ss' semblable au contrastant, fig. 51. Si, en restant toujours sur les angles latéraux, il agissait par deux rangées à droite et à gauche, le résultat serait un *scalénoèdre* semblable au métastatique, fig. 52.

Enfin, si un décroissement avait lieu sur les arêtes latérales, par trois rangées, on obtiendrait un autre scalénoèdre, fig. 53, qui se rencontre dans une variété de calcaire, nommée par Haüy *paradoxale*. Ce scalénoèdre ne pourrait être dérivé du véritable noyau qu'à l'aide d'un décroissement intermédiaire sur les angles latéraux.

Ce dernier résultat nous fait voir que des formes secondaires, qui seraient dérivées du véritable noyau à l'aide de décroissements assez compliqués, peuvent être produites par une autre forme secondaire, en vertu de lois plus simples; aussi Haüy a-t-il opéré souvent de pareilles substitutions, dans le but de remplacer des décroissements intermédiaires par des décroissements ordinaires. Dans le système rhomboédrique, par exemple, les décroissements intermédiaires conduisent toujours à des dodécaèdres triangulaires. Au lieu de faire dériver immédiatement ces dodécaèdres du rhomboèdre primitif, Haüy les détermine en général à l'aide de deux décroissements ordinaires, dont l'un établit d'abord la relation entre le dodécaèdre et un rhomboèdre secondaire, pris pour noyau hypothétique, et l'autre fait dépendre ensuite ce noyau hypothétique du véritable. Par ce détour, il évite la complication dans les résultats de la théorie, en même temps qu'il rencontre plus de facilité pour effectuer les calculs.

La possibilité de transformer en noyau par la pensée toute

forme secondaire a encore cela d'avantageux, qu'elle prouve la généralité de la théorie, et explique pourquoi ses applications n'ont point été restreintes aux seules substances susceptibles de clivage. On sait en effet que beaucoup de minéraux ne laissent apercevoir aucune trace de division mécanique, et cependant cette circonstance n'a pas empêché Haüy d'établir entre les formes secondaires de chacun d'eux, au moyen de noyaux purement hypothétiques, des relations tout aussi rigoureuses, que si la détermination eût eu pour base un noyau *donné* par la structure même du minéral.

§ 16. *Réflexions sur la théorie des décroissements.*

Nous terminons ici l'exposition abrégée de la belle théorie de Haüy, touchant les lois de la structure et de la forme dans les cristaux d'une même substance. On a fait contre cette théorie diverses objections, qui nous paraissent dénuées de fondement, et auxquelles nous croyons devoir consacrer quelques mots de réponse.

On a dit que cette théorie était une pure hypothèse, d'abord parce que rien ne prouvait que les molécules des cristaux eussent précisément la forme polyédrique que Haüy leur assigne. Mais nous avons fait voir en commençant, que la supposition admise par ce savant, d'une identité de forme entre la molécule physique et la particule intégrante, n'était nullement nécessaire; que le seul élément dont la connaissance fût utile, était la particule intégrante du cristal, indiquée par le clivage; que la molécule physique, la véritable molécule du corps, abstraction faite de l'état cristallin, pouvait être tout autre, et que sa détermination rigoureuse était un problème, dont la solution intéressait particulièrement la physique du minéral, mais n'importait en aucune manière à la théorie des cristaux, qui n'a besoin de connaître de cette molécule que son caractère de symétrie. C'est pour cela que nous avons eu le soin de débarrasser complètement cette théorie d'une supposition, qui lui a été non-seulement inutile, mais même nuisible, puisque quelques personnes l'ont tournée contre elle.

On a dit encore qu'elle était hypothétique, parce que l'ordre dans lequel Haüy développait la structure des cristaux secondaires, était contraire le plus souvent à celui qu'avait suivi la nature dans la formation et l'accroissement de ces mêmes cris-

taux. Il est bien certain, qu'*en général*, un cristal secondaire ne commence pas par un noyau d'une certaine forme, qui, à une époque donnée de son accroissement, passerait à une autre forme, enveloppant et masquant la première; quoiqu'une pareille transformation puisse avoir lieu quelquefois, et qu'on l'ait obtenue même fréquemment dans les laboratoires, en faisant cristalliser un sel dans un liquide, dont, après un certain temps, on changeait brusquement la nature. Dans quelques cas donc, la marche de la construction théorique peut se trouver d'accord avec celle de la formation naturelle, mais cela n'arrive que par exception; et dans le plus grand nombre des cas, les cristaux produits par la nature ont pris tout d'abord la forme qu'ils devaient avoir, et qu'ils ont conservée pendant toute la durée de leur accroissement. La distinction admise entre le noyau et la matière qui le recouvre, n'est donc qu'une conception théorique; c'est le centre du cristal qui est le véritable point de départ de l'opération de la nature; d'un premier jet, elle y fait naître un petit embryon cristallin, déjà complet de forme, et cet embryon s'accroît ensuite par une succession d'enveloppes polyédriques, non interrompues, qui se superposent de manière que le cristal, parvenu à un volume sensible, est réellement composé, depuis sa surface jusqu'au centre, de couches d'accroissement parallèles et semblables, emboîtées successivement les unes dans les autres.

Mais Haüy a toujours eu soin d'avertir de cette différence entre l'ordre de la structure théorique et celui de la formation réelle; et dans tous ses ouvrages, il l'a fait ressortir dans un chapitre particulier (1), où il montre comment l'accroissement se combine et se concilie avec le mode de structure qu'indique le clivage. La théorie et la cristallisation, quoiqu'elles suivent une marche différente, ne cessent pas cependant d'être d'accord l'une avec l'autre, et de se rencontrer dans leurs résultats, parce qu'à quelque terme que l'on arrête par la pensée la formation du cristal, il se trouve toujours renfermer un noyau proportionné à son volume, et que le même rapport subsiste toujours entre ce noyau et la partie enveloppante.

A-t-on bien saisi le véritable esprit de la théorie des décroissements, lorsqu'on lui a reproché de ne s'accorder avec les faits que par hasard? Quel est l'objet qu'elle se propose? de nous ap-

(1) *Traité de Minéralogie*, 1re édition, tome I, p. 98, et *Traité de Cristallographie*, t. I, p. 54 et 224.

prendre, non pas comment le cristal s'est formé, mais de quelles parties on peut le considérer comme étant présentement composé; et de quelle manière, après avoir reconnu et séparé ces parties par le clivage, il faut s'y prendre pour les remettre en place, et refaire synthétiquement le cristal. Nous savons que, pour le produire, la nature a pu suivre plusieurs voies différentes; par conséquent, la question relative à son origine est une question particulière de physique, qui pourra recevoir diverses solutions, suivant qu'il s'agira de tel ou tel *individu de l'espèce*. Il n'en est pas ainsi de la question cristallographique : tous les individus de même forme ont généralement une seule et même structure, une seule et même composition moléculaire ou lamellaire, quel qu'ait pu être d'ailleurs le mode de leur production originelle. C'est cette structure intérieure, cette composition actuelle, qu'il s'agit de déterminer. Or, pour cela, que fait-on? on opère l'analyse mécanique du cristal, on le décompose d'une certaine manière, et l'on refait ensuite dans un ordre inverse la synthèse des parties, dont on a ainsi reconnu l'existence et la disposition. Ce n'est donc rien autre chose qu'une analyse ou décomposition mécanique, suivie d'une recomposition du même genre. La décomposition peut se faire d'une façon ou d'une autre; on peut commencer la recomposition par telle ou telle partie : peu importe, pourvu qu'on rétablisse les choses dans leur état primitif. Il en est d'un cristal, qu'on analyse par le clivage, pour le recomposer ensuite par la méthode des décroissements, comme de ces jeux de combinaisons géométriques, de ces mosaïques formées de pièces de rapport, que l'on peut désunir et rassembler en s'y prenant de diverses manières, mais de façon à reproduire toujours le même ensemble.

C'est donc un fait bien constant, et reconnu par Haüy lui-même : un cristal doit être considéré en général comme n'étant dans sa totalité qu'un groupe uniforme et continu de molécules; et l'on ne doit voir, dans la conception du noyau, qu'un moyen de faciliter l'analyse et la synthèse des cristaux secondaires, en isolant de chacun d'eux par la pensée une portion commune et connue d'avance, en sorte qu'on n'ait plus à s'occuper que de la partie extérieure, ce qui est beaucoup plus simple. Haüy n'a pas eu d'autre intention que de choisir, entre plusieurs également admissibles, un procédé par lequel on pût construire des cristaux semblables en tout point à ceux de la nature, mais sans chercher aucunement à suivre le même ordre qu'elle, et cela

ec d'autant plus de raison, que la nature peut aussi varier ses
rocédés, et qu'elle arrive souvent au même résultat par des
ies différentes. Peu importe donc la marche qu'elle a suivie,
urvu que les choses soient réellement ce qu'elles auraient été,
la cristallisation avait commencé par produire le noyau, pour
recouvrir ensuite de lames décroissantes.

Nous avons dit que l'on pouvait s'y prendre de différentes
anières, pour reproduire avec des éléments moléculaires don-
és tous les cristaux secondaires d'un minéral, en faisant en
rte qu'ils aient exactement les mêmes formes et la même struc-
ure que les cristaux naturels. En effet, indépendamment du
océdé par emboîtement continu d'enveloppes polyédriques,
utes semblables entre elles, et représentant les couches d'ac-
oissement des cristaux dans les cas ordinaires, on peut en in-
iquer plusieurs autres, parfaitement équivalents au premier
our le résultat final.

Et d'abord, si l'on juge à propos de passer par une première
orme, par une forme *primitive*, pour arriver aux autres formes
u système, aux formes *secondaires*, il est aisé de voir que la
énération de celles-ci peut être conçue de deux manières oppo-
ées. Toutes les formes secondaires sont autant de modifica-
ions ou de variétés de la forme primitive, qu'on peut considé-
er comme produites, ou par excès, ou par défaut; par addition
ar les faces du noyau, ou bien par retranchement sur ses bords
u angles solides, de portions pyramidales ou cunéiformes, com-
osées chacune de lames régulièrement décroissantes : en sorte
ue la théorie des décroissements peut se modifier, selon le
oint de vue que l'on adoptera, et s'offrir sous deux formes, deux
xpressions différentes.

En effet, on peut toujours par la pensée supposer le même
entre et les mêmes axes à deux cristaux différents d'un même
ystème, et alors l'un d'eux se trouvera inscrit ou circonscrit à
autre, selon qu'il aura un volume moindre ou plus grand. Si
e cristal regardé comme primitif a des dimensions plus petites,
il est placé dans le cristal secondaire comme un noyau, alors
n passera du premier au second par une addition de lames dé-
roissantes empilées sur les faces de ce noyau : ce sera la *mé-
ode des décroissements*, telle que Haüy l'a présentée. Dans cette
anière de concevoir le rapport des deux cristaux, toute forme
econdaire est une variété par excès de la forme primitive.

Mais si le cristal primitif est plus volumineux que le cristal

secondaire, en sorte que, les rôles étant renversés, celui-ci soit à son égard comme une espèce de noyau qu'il faille en extraire, alors le premier cristal, au lieu de s'accroître pour se transformer dans le second, devra diminuer au contraire par une soustraction de lames cristallines, continuellement croissantes à partir de la plus extérieure (ou décroissantes en les prenant dans l'ordre inverse), et dont l'effet sera de *tronquer* le cristal primitif sur ses bords ou sur ses angles solides, qui se trouveront remplacés par de nouveaux plans. On détachera ainsi du solide primitif, aux endroits des angles ou des arêtes, des pyramides ou des coins, dont les dimensions linéaires seront données par les nombres d'arêtes moléculaires, soustraites sur les côtés de cette forme primitive; et l'on pourra déterminer la position de chaque plan secondaire par le calcul des angles du petit solide, dont le retranchement l'aura mis à nu. Les nombres d'arêtes soustraites fourniront en même temps la mesure de chaque décroissement, ou les indices du signe de la face résultante. C'est évidemment la théorie des décroissements transformée en *méthode des troncatures;* ou si l'on veut, c'est la méthode des troncatures expliquée et développée à l'aide des notions générales sur la structure cristalline, que fournit l'étude du clivage.

La figure 54 représente un noyau cubique, qui a subi sur un de ses angles une troncature, ou, en d'autres termes, un décroissement par la soustraction de lames composées de molécules simples; et la figure 55 représente le même noyau, ayant subi un décroissement analogue sur une de ses arêtes. Ces deux figures nous montrent que les lames croissantes ou décroissantes, dont il s'agit ici, ne sont pas formées de molécules qui se juxta-posent par leurs faces, comme dans la théorie de Haüy, mais bien de molécules réunies par leurs bords, et dont aucune n'a de faces parallèles à leur plan de niveau commun. Les lames soustraites étant parallèles aux faces que leur enlèvement a mises à découvert, leur texture moléculaire doit être semblable à celle des faces que produit la méthode ordinaire des décroissements, c'est-à-dire qu'elles doivent en général se composer de cannelures ou de pointes anguleuses, comme les surfaces des solides représentés fig. 23 et 30.

On remarquera encore que dans cette méthode de dérivation par troncatures, la forme secondaire peut être considérée comme n'étant qu'une variété par défaut de la forme primitive, comme

une forme primitive que la cristallisation aurait voulu produire, et qui, par l'effet de quelque résistance, serait restée incomplète.

Voilà donc deux manières différentes de concevoir la génération ou reproduction des formes d'un système cristallin, en les rapportant toutes à l'une d'elles, prise pour terme commun de comparaison, ou regardée comme forme primitive. Mais on pourrait aussi se passer de la double considération des formes primitives et des décroissements, et supprimer tout-à-fait l'emploi de ces expressions, en envisageant la génération des formes cristallines sous un point de vue plus général : il suffit pour cela de recourir à l'idée d'un milieu cristallin indéfini, à structure uniforme, ayant un centre et des axes sur lesquels la distribution des molécules soit connue, et de supposer qu'on vienne, à l'aide de plans coupant ces axes suivant certaines lois variables, circonscrire vers le centre une partie de la masse cristalline, en séparer comme une sorte de noyau, qui donnera immédiatement, sans aucune forme antécédente, une quelconque des formes du système.

Par un point *o* donné dans l'espace figure 56, menons trois droites indéfinies ox, oy, oz, dont les directions soient celles des axes de cristallisation d'une espèce minérale. Concevons que des points matériels, représentant les véritables molécules de cette substance, soient distribués uniformément sur chacune de ces lignes, mais de manière à être distants entre eux de la quantité a sur l'axe Ox, de b sur l'axe Oy, de c sur l'axe Oz. Si, par les points matériels de chaque axe, on mène une série de plans parallèles aux deux autres axes, et que l'on place de nouveaux points matériels aux intersections de ces trois séries de plans, on formera ainsi une aggrégation régulière de points, un réseau continu de mailles uniformes, qui, toutes, auront la figure d'un parallélipipède, et représenteront les particules intégrantes du milieu cristallin. Une de ces particules seulement se voit fig. 56.

Cela posé, si d'après les règles ordinaires de la symétrie, on mène dans chacun des huit angles trièdres déterminés par les axes, des plans coupants, tels que MNP, par exemple, assujettis à la seule condition de passer par trois des points matériels que contiennent ces axes, chacun de ces plans rencontrera une infinité d'autres points de la masse, qui seront toujours répartis uniformément entre eux, quelle que soit la direction particulière du plan; et si, par la pensée, on supprime toute la portion du milieu cristallin que ces plans laissent en dehors, pour ne garder que celle

qu'ils touchent et circonscrivent, on aura ainsi un des cristaux particuliers du système. Ce noyau cristallin une fois obtenu, si l'on rétablit le milieu indéfini, et si l'on suppose que les plans MNP, qui ont servi de premières limites, se déplacent parallèlement à eux-mêmes, en s'éloignant du centre, et prenant successivement les positions M'N'P', M''N''P''..., les nouvelles molécules que ces plans comprendront dans chacune de ces diverses positions, constitueront les couches d'accroissement du cristal, ou les diverses enveloppes dont il doit se revêtir, pour augmenter de volume sans changer de forme.

Les distances OM, ON, OP de l'origine aux points où chaque face rencontre les axes, sont des multiples ma, nb, pc, des dimensions linéaires a, b, c, et la position du plan MNP peut être considérée comme déterminée par le signe (ma, nb, pc), dans laquelle m, n, p ont des valeurs entières, et par conséquent rationnelles. On arrive ainsi tout naturellement à cette loi de dérivation, que nous avons déjà fait connaître sous le nom de *loi de rationnalité* des paramètres (*voyez* p. 97) (1).

En terminant ces réflexions, nous dirons un mot d'une dernière objection que l'on a faite contre la théorie de Haüy. On a dit encore qu'elle était hypothétique, par cela seul qu'elle s'appuyait sur les idées atomistiques, que beaucoup de savants n'admettent point en Allemagne. Mais cette condition lui est commune avec les autres théories physiques, qui toutes reposent sur une pareille base, sur un de ces faits primordiaux, qui ne sont démontrables qu'*a posteriori*, et dont elles doivent prouver la réalité, par l'accord constant de leurs résultats avec ceux de l'observation. Sous ce rapport donc, la théorie des cristaux n'offre rien qui la rende inférieure aux autres. On peut même remarquer à son avantage, qu'elle n'a pas eu besoin, comme certaines théories, celle de l'électricité, par exemple, de se créer une hypothèse qui lui fût propre : elle n'a fait qu'adopter celle qui sert de fondement à la physique générale, et qui, en dehors de la

(1) Si l'on veut que le signe (ma, nb, pc) exprime d'une manière absolue la position de la face, quel que soit celui des huit angles formés par les axes, dans lequel elle ait été construite, il n'est besoin que de supposer que les coefficients m, n, p, puissent recevoir des valeurs positives ou négatives, comme les abscisses et ordonnées de la géométrie analytique. On voit sans peine que le signe (ma, nb, pc) revient à l'équation $\frac{x}{ma} + \frac{y}{nb} + \frac{z}{pc} = 1$ du plan MNP rapporté aux axes ox, oy, oz.

Voir l'Appendice, à la fin du volume.

cristallographie, à l'époque où cette science est née, et longtemps même avant sa création, pouvait déjà passer pour une vérité physique des mieux démontrées. Que sera-ce donc maintenant si l'on fait attention que les faits cristallographiques seuls suffiraient pour la mettre hors de doute, tant ils semblent pour ainsi dire moulés sur elle, tant la preuve qu'ils en donnent est directe, manifeste et palpable. Nous ne craignons pas de le dire : la théorie de Haüy, avec les modifications qu'elle comporte, et qui n'en altèrent pas l'essence, est certainement l'une des plus probables et des plus solidement établies de toutes celles que les physiciens ont imaginées depuis Newton.

§ 17. *Détermination des formes primitives, notation et calcul des formes secondaires.*

Pour pouvoir appliquer la loi des décroissements par files moléculaires, ou des troncatures rationnelles, à la détermination des formes secondaires, il faut d'abord connaître les dimensions de la forme primitive ou du noyau fondamental, puisque c'est par des multiples de ces dimensions que l'on évalue comparativement les sections faites sur les axes ou sur les arêtes de cette forme primitive. Nous avons déjà fait remarquer ailleurs que cette connaissance est facile à acquérir, quand la forme fondamentale est un octaèdre ou un autre solide bi-pyramidal. Dans ce cas, la relation des axes ou des arêtes se déduit immédiatement, par un calcul trigonométrique fort simple, des mesures d'angles fournies par le goniomètre. Mais, lorsqu'à l'exemple de Haüy, on prend pour point de départ un parallélipipède, le rapport des axes ou des arêtes n'est plus donné par les angles, et il faut avoir recours pour le fixer, à un moyen purement cristallographique. Ce moyen consiste à faire usage des petites facettes de modifications qu'on observe presque toujours sur les angles ou sur les arêtes de la forme prismatique choisie pour noyau. Supposons que cette forme soit modifiée sur tous ses angles à la fois par une facette : ces petites facettes prolongées donneraient un octaèdre, c'est-à-dire une forme immédiatement déterminable et dont on peut calculer les axes ; cet octaèdre a ses trois sections principales parallèles aux faces du parallélipipède, dont on veut déterminer les arêtes ; et si l'on transporte parallèlement à elles-mêmes les faces de ce parallélipipède, jusqu'à ce qu'elles passent par les sommets de l'oc-

taèdre, les deux formes seront alors ce que nous avons appelé, p. 100, des *formes corrélatives*, dont le caractère est que les axes de l'une sont égaux aux arêtes de l'autre, et que l'une quelconque des formes dérive de la seconde par la loi de troncature la plus simple, celle dont le signe n'a que des indices égaux à l'unité. Le moyen employé par Haüy se réduit donc dans ce cas à régler les dimensions de la forme primitive sur celles de la forme secondaire, de telle sorte que des décroissements par une seule rangée puissent engendrer les faces de celle-ci sur les angles de la première.

Quant à la détermination des formes secondaires, une fois que la forme primitive est connue dans ses dimensions fondamentales a, b, c, on sait que chacune de leurs faces peut être représentée par un signe cristallographique tel que $(ma:nb:pc)$, suivant la notation de Weiss et de G. Rose, ou tel que $a^m\, b^n\, c^p$, selon la notation francaise, signe dans lequel les indices ou caractéristiques m, n, p sont des nombres entiers. Les indices sont les mêmes dans les deux notations, lorsqu'on part de l'une des deux formes fondamentales corrélatives; seulement l'un des signes se rapporte aux sections faites sur les axes de l'octaèdre, à partir du centre du cristal, tandis que l'autre se rapporte aux sections faites sur les arêtes du prisme correspondant. Mais les sections étant égales dans les deux cas, le même signe subsiste. On doit se rappeler seulement que les cristallographes allemands ont voulu représenter par un seul signe toutes les faces, aussi bien celles qui seraient parallèles à un ou deux des axes, que celles qui les couperaient tous à la fois; et, pour cela, ils ont été obligés d'introduire dans leurs formules le symbole ∞. N'avoir qu'un seul signe, cela parait plus avantageux au premier abord; mais il faut observer que les modifications sur les arêtes étant les plus ordinaires, et les faces primitives se rencontrant aussi très-communément, le symbole de l'infini revient à chaque instant dans les notations allemandes, ce qui produit sur l'œil un effet peu agréable, et il en résulte en définitive une notation moins simple que la notation francaise où toutes les quantités sont des nombres finis. Dans cette notation, deux signes fort simples sont employés concurremment, l'un de la forme $b^{\frac{m}{n}}$ ou $i^{\frac{m}{n}}$, pour les décroissements sur une arête b, ou les décroissements *ordinaires* sur un angle i, l'autre de la forme $a^m\, b^n\, c^n$ pour les décroissements *intermédiaires* sur les angles.

Les signes de Weiss et de Haüy se rapportent aux faces cristallines considérées isolément; Mohs a imaginé un autre système de notation, dans lequel les signes se rapportent, non plus à des faces isolées, mais à des systèmes de faces, savoir : aux formes simples qui résultent chacune d'une modification particulière, et dans lesquelles peut se décomposer toute combinaison cristalline. Ces signes contiennent, comme les précédents, toutes les données nécessaires au calcul des angles : ils ont l'avantage de faire connaître les véritables éléments dont le cristal est composé, c'est-à-dire ses formes simples; mais ils sont assez compliqués et difficiles à saisir, et pour cette raison nous les passerons sous silence. Naumann a cherché à concilier les avantages des deux notations allemandes, celles de Weiss et de Mohs, dans une espèce de signe, fort simple en apparence, tel que mOn, ou mPn, mais qui se diversifie beaucoup, dans les derniers systèmes, par des marques particulières : ces signes sont à la fois des signes qui rappellent les formes, comme ceux de Mohs, et des signes qui expriment la génération des faces à la manière de ceux de Weiss. Seulement, les trois caractéristiques entières m, n, p de ceux-ci sont remplacées par $\frac{m}{p}$, $\frac{n}{p}$, et 1, ou par m, n, 1 en supposant que m et n puissent être fractionnaires, ce qui réduit à deux le nombre des indices variables du signe général.

Chaque plan secondaire ayant ainsi son signe représentatif, deux problèmes se présentent maintenant à résoudre, qui sont inverses l'un de l'autre, et doivent évidemment pouvoir se traiter par les mêmes méthodes ou par les mêmes formules, en les retournant. Voici les énoncés de ces questions, dont la solution compose la plus grande partie de la cristallographie. Etant donnés la forme primitive et le signe cristallographique d'une face secondaire, calculer les angles que cette face fait avec les plans fondamentaux, ou bien, avec d'autres faces secondaires déjà déterminées; et, réciproquement, les angles formés par une face secondaire inconnue, avec d'autres faces connues ou avec les plans primitifs, étant donnés par l'observation directe, calculer les indices du signe qui exprime la génération de cette face. Ce double calcul peut se faire, soit par les formules de la trigonométrie sphérique, soit par celles de la géométrie analytique (*voyez* l'Appendice); et non-seulement on peut ainsi calculer d'avance toutes les formes qui sont possibles, mais on parvient

encore à reconnaître celles qui sont impossibles, parce qu'elles sont incompatibles avec la loi fondamentale de la cristallisation, celle des troncatures rationnelles. Haüy, par exemple, a démontré que le dodécaèdre régulier de la géométrie ne pouvait pas se rencontrer, comme cas particulier du dodécaèdre pentagonal, parmi les dérivés du cube; en cherchant la loi de décroissement qui le donnerait, par le second des problèmes que nous venons d'énoncer, il a trouvé pour l'exposant du signe b^m, la valeur irrationnelle $\frac{2}{\sqrt{5}-1}$ (1).

§ 18. *Des différents modes de structure, ou des variations possibles du réseau, dans un même système cristallin.*

Un fait extrêmement important, auquel on n'est conduit que par la considération des réseaux cristallins, et qui, pour cette raison, a dû échapper à l'attention de tous les cristallographes, M. Bravais excepté, c'est l'existence possible dans chacun des systèmes cristallins admis par les minéralogistes de plusieurs modes ou variations dans la forme du réseau, sans que cette

(1) Le tétraèdre, le cube et l'octaèdre sont les seules formes régulières qui existent parmi les cristaux. Les deux autres, le dodécaèdre et l'icosaèdre réguliers, sont interdites à la cristallisation. Haüy a le premier signalé cette impossibilité; mais sa démonstration, basée sur des arguments théoriques, est insuffisante. Elle fait bien voir que ces deux solides ne peuvent dériver d'un cube, et que, par conséquent, ils ne font pas partie des systèmes cristallins auxquels le cube appartient; mais on n'est pas en droit de conclure de là, que l'un de ces solides ne puisse être par lui-même le point de départ d'un nouveau système, dont le cube ne ferait pas partie. Le dodécaèdre pentagonal régulier est un solide qui a son caractère propre de symétrie : il a six axes égaux de symétrie quinaire, dix de symétrie ternaire, et quinze de symétrie binaire. En le considérant comme forme fondamentale et lui appliquant la méthode des troncatures, pour en tirer tous les dérivés symétriques, on trouve qu'il fait partie d'un système de formes iso-symétriques, composé, comme le système cubique, de sept formes élémentaires. Ces formes sont : le dodécaèdre régulier, l'icosaèdre régulier, le triacontaèdre rhomboïdal ou solide à 30 rhombes égaux, le dodécaèdre pyramidé ou solide à 60 triangles isoscèles, l'icosaèdre pyramidé (autre solide à 60 triangles isoscèles), le trapézoèdre à 60 faces et un scalénoèdre à 120 faces.

On voit par là que le dodécaèdre régulier ou l'icosaèdre régulier ayant la même symétrie, si l'un d'eux était réalisable par la cristallisation, l'autre se rencontrerait nécessairement avec lui dans le même système. Mais tous les deux sont impossibles, par une raison basée sur l'essence même de la cristallisation : c'est qu'il n'existe aucun réseau cristallin, continu et uniforme, qui puisse avoir les mêmes axes et la même symétrie que le dodécaèdre régulier, aucun réseau qui offre la symétrie quinaire.

circonstance apporte aucun changement dans l'ensemble total des faces et des arêtes du système. Nous ne pouvons déterminer la position de ces faces et de ces arêtes que d'une manière relative, et il nous est impossible de tenir compte du nombre réel et des positions absolues des faces ou des arêtes qui répondent à une direction donnée. Or, il est facile de voir que, sans nuire à l'équilibre du système général, le nombre des files ou des plans moléculaires peut varier pour la même direction d'une espèce à une autre dans le même système.

Supposons un réseau cubique, dont la figure 57, pl. XVII, représentera l'une des lames composantes, et qui porte des molécules dans ses sommets seulement, comme nous l'avons toujours admis jusqu'ici.

Si l'on imagine que ce réseau glisse tout d'une pièce dans le sens d'une des diagonales de ses mailles cubiques, de manière que les molécules quittant les sommets aillent occuper les centres, comme l'indique la figure 58, on aura deux réseaux semblables, l'un figuré par des lignes pleines et l'autre par des lignes ponctuées, dont le premier aura des molécules dans tous les sommets de ses cubes générateurs, sans en avoir dans leurs centres, et dont le second en aura dans les centres de ses mailles sans en avoir dans leurs sommets. Ces deux réseaux sont parfaitement équivalents, et, par conséquent, si on les superpose l'un à l'autre, comme on le voit fig. 59, on aura un réseau double, quant au nombre des éléments matériels qui le formeront. Cette superposition n'aura fait que doubler les files de molécules dans chaque direction, mais rien ne sera changé aux relations purement géométriques des diverses arêtes ou faces du système; le mode de structure et l'élément générateur du réseau auront seuls varié. La figure 60 représente la forme cubique génératrice du premier réseau, celle qui le reproduirait par un enchaînement continu de formes pareilles. La figure 61 représente la forme génératrice du second, qui équivaut à l'interposition de deux réseaux semblables au premier.

On pourrait encore obtenir un troisième assemblage symétrique de molécules, dans le même système cristallin, en commençant par superposer quatre réseaux semblables au premier, de manière que leurs nœuds coïncident d'abord, puis faisant glisser l'un d'eux dans la direction d'une diagonale jusqu'à ce que ses molécules aient occupé les centres, comme précédemment, et chacun des trois autres dans une des directions d'arêtes, jusqu'à

ce que ses molécules aient atteint les milieux de ces arêtes. On aurait ainsi un réseau cristallin, quadruple du premier, qu'engendrerait un enchaînement de cubes générateurs, semblables à celui de la figure 62. Tels sont les trois modes de structure, ou les trois réseaux différents dont on peut admettre l'existence dans le système cubique, sans qu'il soit possible de la constater par les seuls caractères géométriques : mais on conçoit que, s'ils existent, il doivent avoir une influence marquée sur les propriétés physiques des cristaux, qu'on rapporte au même système général, et par conséquent on ne doit pas négliger ces différences de structure, dont les analogues se rencontrent aussi probablement dans les autres systèmes.

Une des conséquences que l'on peut tirer de l'existence de ces divers modes de structure, c'est qu'ils peuvent servir à rendre compte des trois modes différents de clivage qu'on observe dans le système cubique, savoir : le clivage cubique, le clivage octaédrique et le clivage dodécaédrique ; comme aussi à expliquer cette habitude particulière de configuration (Ausbildung), cette tendance à produire une certaine forme de préférence aux autres, que l'on remarque dans beaucoup de substances, appartenant au même système. Il y a en effet une prédominance successive, dans les trois modes du système cubique, des axes quaternaires, ternaires et binaires, c'est-à-dire que les molécules sont successivement plus condensées sur ces trois sortes d'axes, ou y sont à une distance plus petite que dans toute autre direction. M. Bravais suppose avec quelque fondement, que les faces de plus facile clivage sont celles dont la densité est la plus considérable, ou qui répondent à des lames dont la distance est la plus grande ; et que la facilité de production des faces naturelles croît aussi avec la densité de leur tissu moléculaire (1).

(1) Conformément à cette hypothèse, M. Bravais a désigné les trois modes du système cubique d'après les formes dont les faces ont une densité maximum ; mais ce n'est que par le calcul qu'on parvient à reconnaître dans chaque mode les formes dont les faces ont la densité la plus grande. Il est une autre manière de dénommer ces modes, qui me paraît plus simple et plus naturellement indiquée par leur structure ; c'est de prendre dans chacun d'eux une molécule pour centre du réseau, et de déterminer la succession diverse des couches ou enveloppes polyédriques que forment les molécules voisines et également distantes de ce centre, selon l'ordre croissant des paramètres. Dans le premier mode, la molécule centrale est entourée d'une première couche de 6 molécules, composant une enveloppe octaédrique ; cette première couche est recouverte d'une seconde couche concentrique de 12 molécules, puis d'une troisième couche de 8 molécules, en sorte que l'on a la série caractéristique $1 + 6 + 12 + 8 + \ldots$

Une autre conséquence, dont l'utilité se fera sentir par la suite, quand nous étudierons les propriétés physiques des minéraux, c'est la variation qui doit avoir lieu dans les cristaux, de certaines données ou constantes physiques, indépendamment de la nature des molécules, et par le seul fait de ces différences de réseau qui se cachent sous un même système cristallin : telles sont celles qu'on désigne, dans tous les corps homogènes, amorphes ou cristallisés, par les noms de volume moléculaire, de densité géométrique et de distance moyenne des molécules. On sait que les chimistes et les physiciens appellent *volume spécifique* ou *moléculaire* (v), le volume propre de la molécule d'un corps homogène, augmenté de la portion de vide qui lui est afférente, quand le vide total du corps a été réparti également entre toutes les molécules ; et ils le déterminent en divisant le poids moléculaire (p) par la densité physique (d) du corps. Par *densité géométrique* d'un corps, on entend la densité de ce milieu, considéré comme un assemblage, plus ou moins lâche ou plus ou moins serré, de points matériels, abstraction faite de leur pesanteur : c'est la même chose que le nombre (n) des molécules physiques comprises sous l'unité de volume (1). Il est facile de voir que la

Dans le second mode, la molécule centrale est entourée d'abord de 8 molécules, composant une enveloppe cubique, puis de 6 et de 12 molécules, en sorte qu'on a la succession suivante $1+8+6+12+\ldots\ldots$ Dans le troisième mode, la molécule centrale est entourée d'un premier groupe de 12 molécules, formant un cubo-octaèdre ; puis vient un second groupe de 6 molécules, suivi d'un troisième de 8 molécules, en sorte que l'on a la série $1+12+6+8+\ldots\ldots$ Ceci posé, il semble naturel de distinguer et de dénommer chaque mode ou assemblage particulier par les formes tangentes à la première enveloppe, et dont les noms rappellent précisément le nombre des molécules qui sont à distance égale, et en même temps *minima*, de la molécule centrale. Selon cette manière de voir, le premier mode serait le mode hexaédrique ou cubique (mode hexaédral de Bravais) ; le deuxième serait le mode octaédrique (mode dodécaédral de Br.), et le troisième serait le mode dodécaédrique (mode octaédral de Br.). Il est d'autant plus important de bien fixer la nomenclature à cet égard, que les autres systèmes cristallins donneront lieu à des distinctions de modes correspondantes à celles-ci ; et ces distinctions ont assez de valeur pour que, dans la classification des systèmes cristallins, on songe désormais à entrer dans le détail des différents modes dont chacun d'eux est susceptible.

(1) Si l'on représente par ε l'intervalle moyen des molécules, on aura, entre les cinq quantités v, n, ε, p et d, la relation suivante :

$$v=\frac{p}{d}=\frac{1}{n}=\varepsilon^3 \text{ (A)},$$

formule qui comprend les trois expressions différentes de la valeur d'ε^3, auxquelles sont arrivés séparément Poisson, Avogrado et A. Bravais. Cette formule nous fait voir que le volume moléculaire, qu'on détermine en divisant le poids moléculaire par la densité, peut servir à faire connaître deux autres éléments, savoir : la densité géométrique n et l'intervalle moléculaire moyen ε.

Dans un cristal, les molécules sont orientées de la même manière : elles sont toutes parallèles entre elles, et, de plus, dans toutes les files de même direction, l'intervalle moléculaire est le même, et par conséquent aussi le degré de condensation des molécules, ou la densité linéaire. Mais d'une direction à une autre, ces deux éléments (la distance moléculaire et la densité linéaire) changent de valeur. Aussi, observe-t-on une variation notable dans l'intensité des diverses propriétés physiques, selon qu'on les mesure dans un sens ou dans un autre. C'est ce qui a lieu, comme nous le verrons bientôt, pour la dureté, l'élasticité, la dilatabilité, la conductibilité, l'action sur la lumière, etc.

Dans le verre, au contraire, toutes les propriétés physiques se montrent exactement les mêmes dans toutes les directions autour d'un point quelconque. Les choses se passent donc dans le verre plus simplement en apparence, et comme si les molécules étaient semblablement disposées et également espacées dans tous les sens à la fois. On sent bien qu'il serait impossible de distribuer de cette manière des points matériels dans un espace fini. Les molécules du verre ne sont donc réellement ni rigoureusement parallèles, ni à des distances parfaitement égales les unes des autres. Mais on doit admettre qu'à raison de leur extrême petitesse et de leur rapprochement considérable, une très-petite longueur d'une droite quelconque, menée par un point du milieu, en contient un nombre très-grand, et qui est sensiblement le même : et, de cette manière, les petites variations de position et de distance des molécules, traversées par cette droite, se compensent dans l'effet total produit par leur somme. De là, une sorte d'état moyen, d'homogénéité apparente, qui sans doute masque à nos yeux une irrégularité réelle.

Mais, pour que ce mode de compensation moléculaire soit le même dans toutes les directions, il faut que le verre ait été refroidi lentement, librement, et d'une manière uniforme. Si le verre a été trempé, ou bien, s'il a été comprimé dans un sens après le refroidissement, la compensation moléculaire est variable, et, dans ce cas, la structure du verre, par ses effets généraux, se rapproche plus ou moins de celle des substances cristallisées.

§ 2. *Structures irrégulières composées.*

La structure irrégulière composée, ou structure d'aggrégation, est celle qui résulte de la réunion en une seule masse d'un

rand nombre de parties distinctes qui, prises chacune à part, nt une structure simple, compacte ou cristalline. Les corps ui la présentent ont donc une double structure, une structure e parties, et une structure d'ensemble. Beaucoup de minéraux mpactes n'ont qu'une structure simple apparente, et manifesnt une structure composée, quand on les examine à la loupe a au microscope. Plusieurs savants sont même de l'opinion qu'il n est ainsi de tous, et qu'un minéral peut toujours être considéré omme étant un aggrégat d'un grand nombre d'individus crisllisés, mais souvent trop petits pour être perceptibles à nos sens.

On distingue plusieurs sortes de structures composées : 1° la ructure *dendritique*. Elle résulte de cristaux groupés en denrites, et formant de nombreuses ramifications au travers d'une atière enveloppante, en sorte qu'elles apparaissent dans toutes s fractures : elle offre plusieurs dispositions secondaires, tricoie (cobalt arsénical), réticulée (oxyde de titane), palmée (gané, bismuth et mica).

2° Les *structures bacillaire*, *aciculaire* ou *fibreuse*, provenant e cristaux très-allongés, bacillaires ou cylindroïdes, aciculaires a fibreux, et groupés entre eux, sans que l'adhérence soit comlète, tantôt dans le sens de leur longueur, tantôt en rayons divergents, en aiguilles entrelacées, en fibres réticulées ou feuées, en masses soyeuses ou cotonneuses.

3° La *structure lamellaire*, produite par l'accumulation d'un rand nombre de petits cristaux ou de grains cristallins, qui résentent leurs faces naturelles et surtout leurs lames de cliage dans tous les sens, en sorte qu'on les distingue par le mioitement particulier que produit chacun d'eux en réfléchissant égulièrement la lumière : si, les grains étant fort petits, la structre se rapproche de celle du sucre, on lui donne le nom de *accharoïde* : exemple, le marbre blanc, dont on fait des statues.)uelquefois les lamelles prennent l'apparence de petites écailles, eu adhérentes entre elles, et qui s'enlèvent facilement au simle contact du doigt ; on dit alors que la structure est *écailleuse* fer oligiste ; hydroxide de manganèse), ou bien *niviforme*, uand cette disposition est jointe à une blancheur parfaite (calaire niviforme). On donne le nom de *structure sublamellaire* à elle de minéraux qui offrent une pâte lithoïde au milieu de quelle sont disséminées des lamelles spathiques, provenant le lus souvent de débris d'encrines ou de madrépores (le marbre oir, dit petit granite).

4° La *structure grenue*, provenant d'une multitude de petits cristaux ou de grains cristallins arrondis, entassés les uns sur les autres, et réunis entre eux avec une force moindre que celle qui unit les particules de chaque grain, en sorte que les parties composantes se détachent par le choc sans se briser (le grenat; le grès à paver).

5° La *structure globulaire* est celle des masses composées de globules compactes, ou à couches concentriques. Elle prend le nom particulier de structure *pisolithique*, quand les grains sont de la grosseur d'un pois (hydrate de fer); et celui de structure *oolithique*, quand les grains sont beaucoup plus petits et comparables à des œufs de poisson (calcaire oolithique).

6° La *structure schisteuse* est propre aux masses composées d'un grand nombre de feuillets séparables, comme les ardoises. Tantôt, comme dans cette roche fissile, elle est le résultat d'un retrait régulier que la roche a éprouvé; tantôt elle provient de l'accumulation d'un grand nombre de petits cristaux plats, déposés les uns sur les autres (spath schisteux, variété de calcaire magnésifère).

7° La *structure stratiforme*, provenant de l'accroissement du minéral par couches successives, que l'on ne peut séparer comme les feuillets de l'ardoise, et qui, souvent, ne sont sensibles que par les veines de diverses couleurs qu'elles forment à la surface du corps ou de ses fractures (exemple : l'albâtre veiné).

8° La *structure compacte*, produite par un entassement confus de particules, si petites et tellement serrées, qu'elles sont indiscernables, et ne forment à la vue simple qu'une masse tout d'une venue, sans aucun indice de tissu. Elle peut être vitreuse ou lithoïde.

9° La *structure terreuse*, produite par un dépôt incohérent de particules fines, qui n'ont pu parvenir à s'aggréger solidement entre elles; ou bien, provenant de substances d'abord solides, et qui se sont désaggrégées ou décomposées.

10° La *structure cellulaire*, ou celle des minéraux dont la masse présente des cavités ou cellules plus ou moins nombreuses et de formes diverses, provenant de ce qu'ayant été originairement fondue par l'action du feu, cette masse a subi un retrait en se consolidant, ou a été traversée et comme boursoufflée par des gaz qui se dégageaient de son intérieur.

11° La *structure organique*, empruntée à des corps organisés

dont le minéral a pris graduellement la place, et dont il a copié fidèlement le tissu (exemple : le silex xyloïde, ou bois pétrifié).

§ 3. *Formes irrégulières et accidentelles.*

Nous avons déjà fait remarquer qu'il n'en est pas des minéraux, sous le rapport de la configuration, comme des corps organisés. Les êtres organiques ont une forme déterminée, qui se perpétue dans chaque espèce, et qui est indépendante des circonstances extérieures au milieu desquelles le corps a pris naissance. Les minéraux, au contraire, n'ont point de forme qui leur soit absolument essentielle, puisqu'ils peuvent continuellement changer d'état sous l'influence des causes extérieures, et s'accroître indéfiniment, soit de tous les côtés à la fois, soit seulement dans quelques-unes de leurs parties. Aussi leurs formes sont-elles généralement accidentelles, étant le résultat des circonstances locales qui ont déterminé, en partie du moins, la réunion des molécules du corps. Il n'est pas jusqu'aux formes cristallines elles-mêmes, qui, seules parmi les formes des minéraux, semblent avoir été réglées pour chaque espèce, qui ne se montrent soumises à la même influence, non-seulement dans les modifications innombrables et régulières, dont le type primitif est susceptible, mais aussi dans les défauts de symétrie et les altérations sans nombre qui peuvent avoir lieu dans chaque forme individuelle, et qui la rendent souvent méconnaissable. Il est bien rare, en effet, que la cristallisation produise des formes parfaitement régulières et symétriques; il faut pour cela une réunion de circonstances qui se rencontrent difficilement. La condition principale qui doit être remplie, c'est que l'aggrégation des molécules ait lieu lentement et sans trouble, et que le cristal soit libre dans tout son pourtour, pour qu'il puisse s'accroître uniformément dans toutes ses parties. Mais des causes perturbatrices de plusieurs genres agissent presque toujours, pour gêner la marche de la cristallisation; et elle ne produit le plus souvent que des formes incomplètes, de simples ébauches de cristaux, dans lesquelles la forme cristalline s'efface ou s'oblitère en partie, se dégrade insensiblement, et finit par se réduire à la forme de lamelles ou de grains, de baguettes ou de cylindres, ou de simples fibres.

Si l'on excepte les formes cristallines régulières, qui sont en rapport plus ou moins immédiat avec la nature des substances,

on peut dire que les formes extérieures des minéraux sont d'une faible importance pour la classification de ces corps, puisque, étant presque toujours accidentelles, elles ne peuvent servir qu'à établir de simples variétés dans chaque espèce. Cependant leur étude ne laisse pas que d'offrir un certain degré d'intérêt et d'utilité, parce qu'elle peut nous aider à nous rendre compte des différences que présentent les minéraux sous le rapport de leur manière d'être dans la nature, et parce que ces sortes de formes nous éclairent souvent sur les circonstances de la formation des diverses espèces. Beaucoup d'entre elles en effet portent l'empreinte des causes particulières qui les ont produites, ou de celles qui ont agi sur le minéral au moment de sa consolidation, ou même postérieurement; et il est presque toujours possible, avec un peu d'attention, et en se laissant guider par l'analogie, de remonter à leur origine, de retrouver leur mode de formation, et d'ajouter ainsi un détail important à l'histoire géologique de la substance. Il n'est besoin pour cela que de les comparer à celles des minéraux, qui se produisent encore sous nos yeux dans telles ou telles circonstances: car, les causes qui ont agi anciennement agissent encore de la même manière aujourd'hui, bien que ce soit souvent sur une échelle différente; ou, si quelques-unes d'entre elles ne s'observent plus dans la nature, nous les trouvons reproduites journellement dans les expériences en petit de nos laboratoires, et surtout dans les travaux en grand de nos établissements industriels.

On distingue, parmi les formes irrégulières et accidentelles des minéraux, les cristaux simples altérés, les groupes de cristaux irréguliers, les concrétions et les nodules, les pseudomorphoses et les formes pseudo-cristallines.

A. *Cristaux simples altérés.*

Beaucoup de cristaux déformés rappellent assez bien leur type originel, pour qu'on puisse les y rapporter sans la moindre difficulté: telles sont les formes *sphéroïdales*, qui dérivent de celles du système cubique, qui ont vingt-quatre ou quarante-huit faces (diamant sphéroïdal); les formes *lenticulaires*, qui dérivent de rhomboèdres très-surbaissés, dont les faces sont plus ou moins courbes, ce qui les fait ressembler à des lentilles (calcaire lenticulaire); les formes *spiculaires* ou *aciculaires*, tirant leur origine de rhomboèdres ou de scalénoèdres aigus, qui, par

leur allongement, offrent l'aspect d'un dard ou d'une aiguille; les formes *tabulaires*, produites par des prismes très-courts; les formes *bacillaires* ou en baguettes, provenant de prismes allongés et d'un diamètre sensible; enfin les formes *cylindroïdes*, dérivant aussi de cristaux prismatiques, dont le contour s'est déformé par des arrondissements.

B. *Groupes de cristaux irréguliers.*

Parmi les groupes irréguliers de cristaux, nous citerons seulement ceux qui offrent des formes imitatives, c'est-à-dire des formes qu'on peut décrire en se servant de termes de comparaison, parce qu'elles ressemblent à celles de certains corps bien connus. Tels sont : 1° les groupes en boule ou *sphéroïdaux*, dans lesquels on reconnaît une aggrégation de cristaux, de fibres ou d'aiguilles cristallines, à leur surface hérissée de pointes pyramidales, ou à leur structure intérieure, rayonnée du centre à la circonférence. 2° Les groupes *cylindroïdes*, composés d'aiguilles ou de fibres qui partent toutes d'un axe commun : on leur donne le nom particulier de *coralloïdes*, quand les fibres forment des branches cylindriques, qui se contournent et se ramifient entre elles à la manière du corail (exemple : arragonite coralloïde). 3° Les groupes *flabelliformes*, composés de lames cristallines qui divergent comme les feuillets d'un éventail (exemples : stilbite, et prehnite flabelliforme). 4° Les groupes *en trémies*, ou en pyramides creuses renversées, tels que ceux de petits cristaux de sel, qui se forment dans les salines par la vaporisation des eaux-mères.

Ces trémies sont composées de rangées de petits cubes de sel, semblables à des cadres rectangulaires, qui seraient appliqués les uns sur les autres en diminuant successivement de grandeur; il résulte de cette disposition une pyramide creuse à quatre pans, dont les parois présentent l'aspect de gradins. Ces groupes se forment à la surface même du liquide. On voit d'abord paraître un petit cube, qui tend à tomber au fond en vertu de sa plus grande densité; et en effet, il s'enfonce au-dessous du niveau, ne laissant presque voir que sa face supérieure; mais il reste en suspension par l'effet de la capillarité : car, on voit le liquide se déprimer tout autour de lui, en sorte que le volume de ce liquide, qu'il a déplacé, dépasse en réalité le sien propre. Ce cube initial devient un centre d'attraction, autour duquel il s'en forme d'au-

tres, qui s'accolent au premier le long de ses arêtes supérieures, et produisent ainsi une espèce de cadre, qui s'enfonce à son tour. De nouveaux cristaux se groupent autour de ce dernier cadre, pour en composer un second, et ainsi de suite. Les cristaux se forment à la surface, parce que le sel, n'étant pas plus solide à chaud qu'à froid, ne tend pas à se déposer par refroidissement, mais seulement par suite de la vaporisation, qui n'a lieu qu'à la surface. Il peut se former autour du premier cube plus d'une rangée dans le même plan horizontal, en sorte que la hauteur des trémies peut varier beaucoup par rapport à la longueur de la base; cela dépend de l'état plus ou moins tranquille du liquide, de son degré de concentration, et de l'intensité plus ou moins grande de l'action capillaire.

5° Les groupes *dendroïdes*, ou les dendrites, les arborisations, dus à l'aggrégation d'une multitude de petits cristaux qui se groupent à la file, en paraissant implantés l'un dans l'autre, et qui produisent de cette manière des ramifications dont l'ensemble offre l'aspect d'un petit arbre. Les cristaux qui se groupent ainsi sont quelquefois reconnaissables à l'œil nu, ou peuvent se distinguer avec le secours d'une loupe; tel est le cas des dendrites formées par les octaèdres réguliers de l'or, de l'argent et du cuivre natifs. Mais souvent ils échappent à la vue par leur extrême petitesse, et ne forment qu'une sorte d'enduit qui s'étend à la surface de certaines pierres, et qui rappellent ces cristallisations que forme l'humidité des appartements, en se congelant pendant l'hiver à la surface des vitres. Cette espèce d'arborisation n'est que superficielle: il est une autre espèce de dendrites, que l'on appelle *profondes*, parce qu'elles pénètrent dans la profondeur de la pierre, qui les enveloppe en tous sens, comme si cette pierre, ayant été d'abord liquide, s'était consolidée en se moulant tout à l'entour; mais il se peut que la cristallisation ait eu lieu dans la matière enveloppante elle-même, soit lorsqu'elle était encore à l'état de mollesse, soit même après sa consolidation, si la pierre était assez poreuse pour être perméable à certains liquides. Nous citerons comme exemples d'arborisations profondes, celles que présentent certaines agates, qu'on emploie dans la bijouterie.

On donne d'une manière générale le nom de *druse* à une sorte d'incrustation formée à la surface d'une roche ou d'un minéral par de petits cristaux d'une autre substance, qui semblent y être implantés, en même temps qu'ils sont serrés fortement les uns

re les autres. Beaucoup de minéraux sont ainsi tapissés exurement de druses calcaires ou quarzeuses.

C. *Concrétions.*

est des corps dont les configurations sont dues, en tout ou en ie, à de certaines circonstances locales ou extérieures, telles des points d'attache, des supports ou des espèces de moules, ien des conditions particulières de mouvement, qui ont influé eur forme, ou l'ont même déterminée tout-à-fait. Ce sont là ormes qu'on nomme accidentelles, parmi lesquelles nous erons d'abord les *concrétions*. Sous cette dénomination on prend généralement toutes les formes à surfaces courbes, résultent de dépôts par couches successives des molécules articules d'un minéral, autour d'un centre ou d'un axe, ou un corps solide, qui a servi de support ou de noyau. Ces ies peuvent d'ailleurs exister avec des traces visibles ou sans in indice sensible de cristallisation à l'intérieur. Telles :

' Les *stalactites*. Ce sont des dépôts de forme conique allonqui résultent de l'infiltration d'une eau minérale à travers oûte d'une grotte ou cavité souterraine; ils se font verticalent de haut en bas à la surface de la voûte, et grossissent par ches successives, en même temps qu'ils s'allongent progresment, à la manière des aiguilles de glace qui se forment pent l'hiver au bord de nos toits. On observe dans la nature des ictites d'espèces très-diverses; mais il est probable que la art d'entre elles ont été formées comme les stalactites cales, qui se produisent encore de nos jours, et dont nous is décrire ici le mode de formation.

es stalactites calcaires sont composées de carbonate neutre haux, sel insoluble dans l'eau pure, mais qui peut être dis par l'eau contenant une certaine quantité d'acide carbone. Beaucoup d'eaux souterraines sont dans ce cas, et chart des molécules calcaires qu'elles déposent aussitôt qu'elles vent au jour ou du moins à l'air libre, parce qu'elles y pert leur acide carbonique, et se concentrent de plus en plus l'évaporation. Cette propriété qu'ont certaines eaux natus, en apparence très-pures et parfaitement limpides, de fordes dépôts terreux, leur a fait donner le nom de sources *intantes*. Admettons qu'une pareille eau minérale s'infiltre

dans les fissures des roches, qui forment les parois d'une grotte souterraine, ou suinte à travers leur tissu poreux, il y aura des gouttes qui resteront suspendues pendant un certain temps à la voûte, et qui se succéderont à la même place; la première éprouvera un dessèchement qui commencera par la surface extérieure, et les molécules calcaires que le liquide abandonnera, se déposeront tout autour de la base sur la paroi de la voûte, en formant une espèce d'anneau ou un rudiment de tube. Ce rudiment de tube s'accroîtra ensuite et s'allongera par l'intermède des gouttes qui se succèderont les unes aux autres. D'abord ce tube présente la forme d'un cylindre creux, et ressemble à un tuyau de plume; mais bientôt il grossit à la fois en dehors comme au dedans par le liquide qui descend le long de sa surface ou qui coule dans son intérieur; le canal finit par s'obstruer, et comme les dépôts sont plus abondants à la base que vers l'extrémité, à raison de l'appauvrissement progressif du liquide, la stalactite doit offrir bientôt l'apparence d'un cône très allongé.

Une partie de l'eau, en tombant de la voûte sur le sol, y forme d'autres dépôts composés de couches ordinairement ondulées, et qui s'étendent horizontalement sur le sol de la caverne; et en même temps, le liquide qui coule le long des parois latérales de la grotte, donne naissance à des dépôts dont on peut comparer la forme à celle de draperies à plis ondoyants (dépôts *panniformes*), ou à celle d'une nappe d'eau qui viendrait à être subitement congelée. On donne le nom de *stalactites*, aux dépôts allongés qui se forment à la voûte, et celui de *stalagmites*, aux dépôts aplatis qui se forment sur le sol de la grotte. Les stalagmites des cavernes recouvrent souvent des amas considérables d'ossements fossiles; ces matières calcaires, quand elles sont translucides, sont employées quelquefois pour la décoration sous le nom d'*albâtres*. Il arrive souvent que les stalagmites des cavernes, en prenant de l'accroissement, vont rejoindre les stalactites qui descendent de la voûte, et forment ainsi d'énormes colonnes, qui décorent majestueusement l'intérieur de la grotte. Il existe en France plusieurs cavernes qui sont remarquables sous ce rapport; mais une des plus célèbres qu'on puisse citer, est celle d'Antiparos, dans l'Archipel grec, qui a été visitée et décrite par Tournefort. Ce savant, en la voyant, s'imagina que les pierres végétaient ou croissaient à la manière des plantes, et cette erreur d'un grand botaniste a eu des partisans, jusqu'au

nent où le progrès des sciences naturelles a amené sa dispa-
m pour toujours, en même temps que celle de beaucoup
tres préjugés.

º Les *pisolithes*. Nous venons de voir que la forme conique
direction verticale des stalactites étaient dues principale-
it au mouvement descensionnel du liquide, qui déposait
s particules composantes. C'est encore à une circonstance
ticulière de mouvement qu'il faut attribuer la forme de ces
bules à couches concentriques qu'on nomme des *pisolithes*,
nd ils sont de la grosseur des pois, des *dragées* ou des
ndes, quand, par leur volume, aussi bien que par leur struc-
et leur mode de formation, ils sont comparables aux dra-
ou amandes des confiseurs. Ces formes globulaires pro-
nent de ce que la source incrustante, qui leur a donné
sance, sortait en bouillonnant de l'intérieur du sol, et for-
t des tourbillons dans le bassin qui recevait ses eaux. Celles-
ar leurs mouvements soulevaient et tenaient en suspension
petits grains de sable, qui, devenant comme autant de cen-
d'attraction pour la matière dissoute, se sont recouverts
cessivement de pellicules de la substance précipitée. Il s'est
duit ainsi des globules dont le volume a dû s'accroître jus-
au moment où, devenus trop lourds, ils sont tombés au fond
l'eau, où souvent ils se sont réunis et agglutinés entre eux
ir former des masses à structure globuliforme. On voit sou-
t de nos jours des globules de la grosseur d'un pois, ou de
e d'une dragée, se produire de la sorte dans les eaux char-
s de carbonate calcaire, des bains de Vichy, dans le dépar-
ent de l'Allier, de Carlsbad en Bohême, de Tivoli dans les
irons de Rome, etc. Lorsque les globules sont beaucoup plus
its que des pois, et de la grosseur des œufs de poisson, on
r donne le nom d'*oolithes*, et ils rentrent alors dans la caté-
ie suivante de formes concrétionnées et accidentelles. On
nait non-seulement des pisolithes calcaires, mais encore des
lithes ferrugineuses, manganésiennes, etc., qui, sans doute,
été produites par des sources à la façon des premières.

º Les *oolithes*. On comprend sous ce nom, des masses for-
s de petits grains ronds, de même grosseur, et d'un volume
parable à celui des œufs de nos poissons ordinaires. Ces
ses globuliformes ne se distinguent pas seulement des piso-
es par la petitesse des grains; ceux-ci offrent plus rarement
structure testacée, ou à couches concentriques; ils sont sou-

vent compactes ou terreux à l'intérieur; et, tandis que les pisolithes ne constituent jamais que des formations très-circonscrites, les oolithes, au contraire, constituent le plus souvent des masses excessivement étendues, d'immenses couches, et même des montagnes entières. A raison de ces différences, on a pensé que les causes qui avaient ainsi granulé la matière des roches oolithiques, devaient avoir été tout autres que celle qui donne naissance aux pisolithes. Ces causes, on ne peut que les présumer, car elles ont agi pour la plupart à des époques géologiques fort anciennes; elles peuvent d'ailleurs avoir été de nature très-variée, chimiques, physiques ou purement mécaniques. Suivant MM. Fournet et Virlet, les oolithes auraient été produites dans des eaux tranquilles et peu profondes, tenant en dissolution de la matière calcaire; et suivant le premier de ces géologues, à la surface même du liquide, à la manière des trémies de sel dont il a été question ci-dessus p. 309 : comme celles-ci, elles y seraient restées en suspension pendant un certain temps à la faveur de l'action capillaire. D'après le second de ces savants, c'est au sein même de la dissolution qu'elles auraient pris naissance, la matière calcaire ayant été comme attirée par une multitude de petits corps ovoïdes, que M. Virlet croit avoir été des œufs d'insecte. Selon d'autres géologues, ce serait au milieu d'un dépôt calcaire non encore consolidé, et se trouvant dans un état pâteux, qu'aurait eu lieu postérieurement la globulisation. Enfin, on a eu recours aussi à des actions mécaniques, pour rendre compte de ces singulières concrétions, et on les a expliquées tantôt par l'agitation d'une eau minérale incrustante, comme les pisolithes ordinaires, et tantôt par l'action des courants mécaniques ou des vagues sur la surface d'un sédiment calcaire déjà consolidé.

4° Les *rognons* et *géodes*. Il existe des concrétions de forme globuleuse, auxquelles on donne les noms de rognons et de nodules, et, quand elles sont creuses à l'intérieur, celui de géodes; elles se distinguent des autres formes arrondies dont nous venons de parler, en ce qu'on les trouve disséminées au milieu des roches, et comme empâtées par elles. Elles ont souvent une forme sphéroïdale ou ovoïde; mais quelquefois elles présentent celle d'un cylindre qui serait arrondi à ses deux extrémités, ou bien elles offrent des dépressions, des aplatissements, des étranglements; enfin, on rencontre des nodules qui se superposent et même se pénètrent, comme si l'un d'eux, encore mou, avait

édé à la pression de l'autre. La formation de ces rognons a été ttribuée à des causes diverses; et en effet, il en est qui sont resque contemporains du dépôt de la roche qui les enveloppe, t qui se sont formés au milieu d'elle avant qu'elle ait eu le emps de se consolider entièrement; et d'autres sont évidemment postérieurs à la consolidation du terrain.

Parmi les premiers, nous citerons d'abord les concrétions globulaires de grès, formant des amas botryoïdes, qu'on rencontre lans les sables de la forêt de Fontainebleau, où elles ont été roduites par l'agglutination des grains sableux à l'aide d'un ciment calcaire, que des eaux d'infiltration auront apporté. Le lus souvent, les nodules répandus en grand nombre au milieu de la roche, où ils sont distribués avec une certaine régularité, proviennent d'une élection de parties qui s'est opérée près le dépôt dans la roche encore à l'état de mollesse; la matière qui les compose était d'abord uniformément disséminée ans toute l'étendue de cette roche; et elle s'en est séparée pour ller se concentrer par places autour de certains centres, déterminés quelquefois par la présence d'un corps organique, dont n retrouve les traces au milieu du rognon : tels sont les nodules de silex pyromaque, qu'on trouve disséminés au milieu de a craie blanche. La silice qui les forme a sans doute été répandue dans toute la roche à l'état de silice gélatineuse; puis elle a té comme secrétée par elle, et s'est concrétionnée alors sous orme nodulaire. Tels sont encore les rognons d'argile ocreuse, u de fer hydraté argileux, qu'on trouve disséminés au milieu es sables ou des marnes dans les terrains sédimentaires. Ces erniers rognons sont quelquefois creux, et leur cavité est occupée par une matière terreuse, soit pulvérulente, soit compacte. On donne en général le nom de *géodes* à ces rognons creux; et uand ils sont de nature ferrugineuse, avec un noyau mobile ntérieurement, noyau que l'on entend résonner, si l'on agite le odule près de l'oreille, on les désigne alors sous le nom d'*ætites*, u de *pierres d'aigle*; ils ressemblent alors par leur forme à un œuf d'oiseau de grande taille.

Les rognons de formation postérieure à la consolidation de a roche enveloppante, sont ceux d'agate que l'on trouve disséminés dans des roches plutoniques ou d'origine ignée, tels que es porphyres, les trapps et les basaltes, roches qui renferment ouvent des cavités, dans lesquelles la silice amenée par des infiltrations venues du dehors, ou provenant d'une sorte d'exsu-

dation de la roche elle-même, s'est déposée par couches successives à partir de la surface, en sorte que l'accroissement du nodule, dans ce cas, a marché de l'extérieur vers l'intérieur. Lorsque ces nodules sont d'un petit volume, on leur donne le nom d'*amandes*. Les couches concentriques, dont le nodule est composé, sont visibles sur les surfaces de section par des zônes de diverses couleurs, ou tout au moins de nuances différentes, comme on le voit dans les belles agates onyx, qui viennent d'Oberstein. Quelquefois aussi, on aperçoit sur la coupe la trace du canal par laquelle la matière du nodule s'est introduite, et l'on voit les zônes de couleurs différentes, se resserrer en s'amincissant à mesure qu'elles se rapprochent de ce canal, vers lequel elles convergent et où elles s'engagent, en se dirigeant parallèlement à ses parois.

Les nodules ainsi produits sont rarement pleins : il reste ordinairement vers le centre une cavité plus ou moins grande, dont les parois sont tapissées d'une multitude de cristaux limpides et brillants de quarz, qui sont implantés par une de leurs extrémités dans la substance compacte de la géode, en même temps qu'ils tournent l'autre extrémité vers le centre. Des cristaux d'une autre nature, tels que des cristaux de calcaire ou de silicates faisant partie du groupe des zéolithes, s'observent aussi quelquefois dans la même cavité, reposant sur les cristaux de quarz-hyalin. La croûte extérieure de la géode a toujours un aspect terne et terreux, et c'est encore une raison pour laquelle ce genre de nodule a pu recevoir le nom de géode. Lorsqu'on vient à le briser, on est tout surpris de le trouver si brillant à l'intérieur ; un pareil contraste a dû faire remarquer de tout temps ces singuliers nodules, qui, d'ailleurs, peuvent fournir des pierres d'ornement assez recherchées. Les zônes de différentes nuances qu'elles présentent sont quelquefois très-nombreuses, et par cela même excessivement minces : on peut en compter plus de cent, surtout dans les nodules qui sont pleins ou à peu près ; et le nombre en paraît bien plus considérable encore, si on les regarde avec une loupe. Lorsqu'on taille ces agates zonaires de telle manière que chaque fragment offre une série de bandes à peu près droites et parallèles, à bords nettement tranchés, on obtient ce que l'on appelle, dans le commerce de la bijouterie, des *agates rubanées ;* quand les bandes sont curvilignes et concentriques, on a des *agates onyx*. Les zônes intérieures, qui montrent ordinairement entre elles un parallé-

lisme si parfait, ne sont pas toujours concordantes avec les parois de la cavité : aussi, dans une géode arrondie, on observe quelquefois des zônes à contour polygonal : ce cas particulier donne lieu aux agates dites *à fortifications*.

Il est encore une classe de nodules arrondis, qui n'appartient plus aux concrétions proprement dites, et dont nous parlerons ici, pour empêcher surtout qu'on ne les confonde avec les rognons dont il vient d'être question. Ce sont ceux que nous offrent les *galets* ou *cailloux roulés*, et les *blocs erratiques* que l'on trouve abondamment dans le lit des torrents, sur les bords et à l'embouchure des grands fleuves, au fond et sur la grève des mers, et qui composent en outre, dans l'intérieur des terres, des amas immenses, non-seulement à la surface du sol, mais même à d'assez grandes profondeurs, comme aussi à des hauteurs très-considérables au-dessus du niveau des plaines. Le caractère propre de ces sortes de nodules, c'est d'avoir été produits par des causes mécaniques, qui ont agi postérieurement à la consolidation de leur substance. On ne peut avoir aucun doute sur l'origine de la plupart de ces dépôts, puisqu'on en voit de semblables se former encore de nos jours, et s'accumuler au fond des vallées et dans toutes les parties basses de nos continents. Ces galets proviennent de débris de roches décomposées sur place par des météores atmosphériques, ou bien de fragments détachés des montagnes, du bord des rivières et du rivage de l'Océan, et qui, roulés par les torrents, charriés par les fleuves, ou balancés par les flots de la mer, s'usent et s'arrondissent par leur frottement mutuel et par l'action érosive des eaux courantes. Lorsque ces matières roulées sont réduites à l'état de petits cailloux ou de grains, on leur donne le nom de *gravier* ou de *sable*; et si les galets ou les grains de sable sont réunis entre eux en une masse solide, ce qui a lieu souvent à l'aide d'un ciment de nature variable, il en résulte ce qu'on appelle des *poudingues* ou des *grès*.

D. *Pseudomorphoses.*

Il arrive souvent qu'un minéral se présente sous des formes qui lui sont tout-à-fait étrangères et qu'il a dérobées ou empruntées à d'autres corps préexistants, soit organiques, soit inorganiques. Ce sont ces formes que Haüy a appelées des *pseudomorphoses*. Cet emprunt de formes a pu avoir lieu de différentes manières :

1° *Par infiltration dans des matières meubles* d'une eau minérale, chargée d'une substance qui a servi de ciment dans l'aggrégation des particules sableuses ou argileuses, comme on l'a vu plus haut pour les rognons de grès ou de sable agglutiné, formant des masses mamelonnées ou botryoïdes, dans le sol de la forêt de Fontainebleau : mais ici il y a une circonstance de plus, c'est la cristallisation du ciment calcaire, qui s'est opérée au milieu du sable sans avoir été gênée par la présence de ces particules étrangères, et qui a enveloppé dans les mailles de son réseau un grand nombre de ces particules. C'est ainsi qu'ont été formés les cristaux en rhomboèdres aigus, qui ont tout-à-fait l'apparence extérieure du grès, et qu'on a nommés fort improprement *grès cristallisé de Fontainebleau*. La forme en rhomboèdre aigu, de la variété que Haüy nomme *inverse*, n'appartient pas au grès que l'on voit, mais à la matière calcaire interposée, dont on aperçoit quelquefois des traces, mais qui, le plus souvent, se dérobe à la vue, parce qu'elle est masquée par la présence tout-à-fait accidentelle des grains de sable quarzeux. Aux yeux de Haüy, ce sont tout simplement des cristaux de calcaire quarzifère, qu'on doit placer comme variété de mélange dans l'espèce du carbonate de chaux. Mais si l'on voulait les ranger parmi les variétés du quarz, ils en constitueraient une variété pseudomorphique, dont la forme serait empruntée de l'une de celles qui sont propres au calcaire.

2° *Par incrustation ou moulage*. Le premier cas, celui de l'incrustation a lieu, par exemple, lorsqu'un liquide chargé de matière calcaire la dépose à la surface de différents corps organisés, animaux ou végétaux, et les revêt d'une croûte pierreuse qui en retrace la forme extérieure avec plus ou moins de fidélité. Il existe en France, à Saint-Allyre, près de Clermont, département du Puy-de-Dôme, à Saint-Nectaire et dans d'autres lieux, des sources qui possèdent cette vertu incrustante : on y plonge des nids d'oiseaux, de petits paniers de fruits, des branchages, qui se recouvrent en très peu de temps d'une enveloppe pierreuse. Le vulgaire s'imagine que ces sources ont la propriété de pétrifier, c'est-à-dire selon lui, de changer en pierre les matières organiques : c'est une erreur grossière. Nous verrons plus bas quels sont les cas où l'on peut dire qu'il y a pétrification, et ce que l'on doit entendre par ce mot. Ici, les matières organiques ne font que se revêtir d'un enduit pierreux, sous lequel elles peuvent se conserver plus ou moins longtemps et se détruire

uite spontanément, mais sans avoir été en aucune manière érées ni remplacées par la matière du dépôt. Nous avons dit e cette propriété de certaines eaux, de pouvoir former des instations, tenait à la présence, et au dégagement à l'air libre, n principe gazeux, tel que l'acide carbonique, et qui, s'étant uvé en excès dans ces eaux, y avait favorisé la dissolution de natière calcaire.

A Saint-Nectaire en France, aux bains de Saint-Philippe en scane, et à Tivoli, dans les environs de Rome, on a su tirer ti de cette propriété, pour fabriquer des médaillons et de pebas-reliefs avec des moules creux en soufre, sur lesquels on : jaillir d'une grande hauteur l'eau de la source, divisée en multitude de gouttelettes très-fines par son passage au tras de faisceaux d'épines. Des incrustations de ce genre, dues les dépôts chimiques d'une nature quelconque, et qui ont pect cristallin, ou bien à des dépôts grossiers de matière terise, ont pu se produire tout autour de cristaux d'une autre ture, qui ont servi de moule ou de support. La dolomie, le arz, la pyrite, ont souvent formé des druses ou des incrustais cristallines tout autour des rhomboèdres du calcaire ordiire, ou des cubes du spath fluor : et ces dernières étant venues e détruire, il est resté souvent des enveloppes creuses de me polyédrique, représentant celle de la substance qui a disu. Ce sont des pseudomorphoses par enveloppement de crisix (Umhüllungs-Pseudomorphosen).

Des eaux calcarifères, qui se rendent dans un lieu maréca-ux, y incrustent souvent les herbes qui y croissent, et finissent elquefois par combler le marais d'un dépôt calcaire, généranent grossier et poreux, auquel on donne le nom de *tuf* en ince, et de *travertin* en Italie. La pierre de Château-Landon at on fait usage dans les constructions à Paris, est un tuf ou vertin, de l'époque tertiaire, qu'on trouve en couches consiables dans les terrains parisiens; celle avec laquelle les anns Romains avaient construit la plupart de leurs édifices, est dépôt du même genre, formé par les eaux de l'Anio, et qui ivre une partie de la campagne comprise entre Rome et voli.

Souvent les eaux de sources incrustent de dépôt calcaire les yaux de conduite qui les amènent dans les villes, comme il ive à Paris pour les eaux d'Arcueil. Dans les campagnes, elles rustent le sol même sur lequel elles se répandent : il existe

près de Clermont un ruisseau, qui, non-seulement a incrusté le fond de son lit et ses bords, mais qui s'est construit à lui-même une sorte de pont-aqueduc, au moyen duquel il a pu franchir un autre cours d'eau, qui coule maintenant au-dessous de lui.

Les incrustations par moulage sont des dépôts purement mécaniques de matières pâteuses, qui viennent se mouler dans l'intérieur des coquilles et autres corps organiques creux, ou dans la cavité formée au milieu d'une roche par la destruction d'un cristal : ou bien, qui viennent se modeler autour de l'un de ces corps, de manière à en prendre une empreinte. Par des combinaisons de moulages et de contre-moulages, on peut ainsi obtenir d'un corps organique creux, comme par exemple d'une coquille univalve de forme conique, jusqu'à six représentations différentes du même corps, telles que moules et modèles de l'intérieur seulement, ou bien de l'extérieur, ou enfin de la coquille elle-même tout entière. Ces traces d'anciens corps organiques, qui n'existent plus, sont communes dans les calcaires des environs de Paris, et leur étude est très-importante au point de vue de la géologie; elles rentrent dans la classe générale des corps, que dans cette science on nomme des *fossiles*.

Lorsque cette espèce de moulage, opéré par un sédiment mécanique, a lieu dans la cavité restée vide par la retraite ou la destruction d'un cristal, il en résulte une copie exacte de la forme de ce cristal, une pseudomorphose par remplissage (Ausfüllungs-Pseudomorphose).

3° *Par épigénie*. Indépendamment des fausses formes cristallines, produites par l'enveloppement de certains cristaux, ou le remplissage des vides que d'autres cristaux, en se détruisant, ont laissés au milieu de la roche qui les contenait, il en est de bien plus remarquables encore, qui composent une classe très-nombreuse de pseudomorphoses, et dont l'étude est de la plus haute importance : ce sont celles qui sont produites par *épigénie*, c'est-à-dire par un changement de nature de la masse d'un cristal, qui s'opère en lui lentement et graduellement, sans qu'il y ait ni fusion, ni dissolution, et, par conséquent, avec conservation de la forme primitive. Cette altération métamorphique, ou plutôt métasomatique, d'un cristal, a lieu par l'action de la chaleur ou des courants électriques, ou bien elle est le résultat d'une action chimique qui se passe entre le corps et le milieu qui l'environne, et que des gaz ou des liquides déterminent le plus souvent. Le changement commence à la surface, et marche

aite progressivement vers le centre ; mais il peut avoir été in-ompu, avant d'avoir atteint son terme, et, dans ce cas, il e à l'intérieur un noyau encore intact de la substance pri-ive. Cette substitution graduelle d'une matière à une autre ait pour ainsi dire de molécule à molécule, de telle sorte que nouvelles tendent à occuper la place des anciennes ; et il ar- en effet quelquefois que le minéral épigène conserve des es de la structure, soit laminaire, soit fibreuse, que possédait minéral antérieur.

orsque le corps, qui a subi l'altération chimique, est un mi-al, comme nous l'avons supposé jusqu'ici, le résultat de cette ration est une *épigénie minérale;* mais si le corps est une sub-ice organique, une tige d'arbre par exemple, dont tous les nents aient été remplacés par des molécules siliceuses, c'est s une *épigénie organique*, que l'on distingue sous le nom ticulier de *pétrification*. Parlons d'abord des épigénies miné-s, ou épigénies proprement dites.

° *Épigénies minérales*. C'est Haüy qui a créé le mot épigénie r désigner ce genre de pseudomorphoses, produit par une smutation de substance, qui s'est opérée sans qu'il y ait eu ngement dans la forme du minéral ; en sorte que la forme il présente actuellement n'est plus en rapport avec la matière le constitue. Naumann désigne ce changement de substance le nom de métasomatose. On sent combien il est important connaître les faits de ce genre, qui pourraient faire tomber servateur dans de graves méprises. Aussi ce phénomène a-t-il étudié avec soin par beaucoup de minéralogistes, parmi les-ls nous citerons MM. Blum, Landgrebe, Haidinger, Winkler, eerer, etc. (1). On connaît aujourd'hui plus d'une centaine pèces minérales, dont la forme a été prise par d'autres espèces les ont remplacées, ce qui constitue celles-ci à l'état de miné-x pseudomorphes ou épigènes. Les minéraux remplaçants ou stitués sont beaucoup moins nombreux, parce que le même néral peut se rencontrer successivement sous les formes pro-s à plusieurs autres. Il est en effet des substances qui semblent comme le terme commun vers lequel tendent un grand

(1) Consultez sur ce sujet intéressant les ouvrages suivants : Landgrebe, *Ueber Pseudomorphosen im Mineralreiche;* Cassel, 1841. Blum, *die Pseudomor-en des Mineralreiches;* Stuttgardt, 1843 ; avec deux suppléments. Haidin-*Abhandlung Ueber die Pseudomorphosen, Ann. de Poggendorf;* 1844, XII. Dr Winkler, *die Pseudomorphosen des Mineralreiches;* Munich, 1855. cheerer, *Bemerkungen Ueber Afterkrystalle;* Brunsvick, 1857.

nombre de minéraux, rapprochés par leur nature chimique, lorsqu'ils donnent prise aux agents de décomposition. La stéatite a été observée en remplacement de plus de vingt espèces différentes; la silice de même; le mica en remplace une douzaine; la serpentine et la chlorite, chacune de huit à dix; le talc, le kaolin, l'argile lithomarge et la terre verte, chacun cinq. Parmi les substances métalliques, la pyrite, le fer magnétique, la gœthite et la limonite sont celles que l'on observe le plus souvent à l'état pseudomorphique.

On peut distinguer cinq groupes différents d'épigénies, ou de pseudomorphoses métasomatiques (Umwandlungs-Pseudom^{n}, ou Afterkrystalle, des minéralogistes allemands), selon le mode ou le degré de l'altération subie par le minéral primitif.

a. Epigénies sans perte ni gain de matière. — Ce cas s'observe seulement parmi les composés chimiques, qui donnent lieu au dimorphisme. Exemple : cristaux d'arragonite changés en calcaire spathique; cristaux de soufre en prismes obliques, changés en soufre octaédrique (octaèdres droits à base rhombe). Le passage consiste seulement dans un changement de constitution physique, dans une allotropie ou métamérie de la première substance. On donne quelquefois à ce genre d'épigénie, le nom de *Paramorphose*.

b. Epigénies par déperdition de principes composants. Exemples : le cuivre natif, provenant du cuivre rouge ou cuivre oxydulé; le sulfure d'argent, provenant de l'argent rouge ou argent sulfuré antimonié; le calcaire (carbonate de chaux), d'après la gay-lussite (carbonate de chaux et de soude); le disthène, d'après l'andalousite, etc.

c. Epigénies par addition de nouveaux principes composants. Exemples : le gypse (sulfate de chaux hydraté), provenant de l'anhydrite ou karsténite (sulfate de chaux sans eau); le fer oligiste, provenant du fer magnétique; la malachite, du cuivre rouge; le sulfate de plomb, du sulfure de plomb.

d. Epigénies par échange partiel de parties composantes, ce qui est un cas très-ordinaire. M. Blum cite près de cent-vingt épigénies, qui rentrent dans cette division. Exemples : la barytine (ou sulfate de baryte), provenant de la withérite (carbonate de baryte); le calcaire, d'après le gypse ou l'anhydrite; la stéatite, remplaçant le quarz; la gœthite ou hydroxyde de fer, provenant de la pyrite, ou du fer spathique; la malachite, provenant de l'azurite; la hornblende, provenant du pyroxène augite; le

lin, provenant du feldspath orthose; la pyrolusite et la haus-
anite, provenant de la manganite, etc.

. Epigénies par remplacement total (Verdrängungs-Pseudo-
phosen). Exemples: le quarz et le calcaire, d'après la bary-
; le quarz, d'après la fluorine et le gypse. Ces sortes d'épigé-
sont difficiles à distinguer des pseudomorphoses par moulage,
it nous avons parlé précédemment. On les explique par une
le et même opération chimique, produisant en même temps
lissolution de la substance primitive et la précipitation du
veau corps, de manière que chaque molécule dissoute soit
placée à mesure par une molécule précipitée.

Epigénies organiques, ou *pétrifications*. Les pétrifications
t les épigénies du règne organique: ce sont de véritables
iles, dont la considération appartient bien plus à la géologie
à la minéralogie. Les plus remarquables sont celles que nous
ent les bois dits *fossiles* ou *pétrifiés*, c'est-à-dire les bois qui
été enfouis très-longtemps dans les couches de la terre, et
l'on trouve ordinairement convertis en silex, ou plutôt rem-
cés par des molécules siliceuses; car on ne peut admettre
l y ait ici transmutation de substance, il n'y a qu'une simple
stitution. Le corps organique a été détruit par une action
te et progressive, couche par couche, et pour ainsi dire molé-
e par molécule; et, à mesure que chacune de ces molécules
lécomposait, une molécule siliceuse en prenait exactement
place. Aussi, non-seulement la véritable pierre qui résulte
cette action chimique souterraine présente la forme exacte
végétal, mais encore tous les détails de son organisation in-
ne, à tel point que l'on peut souvent reconnaître à quelle
se de plantes il appartenait. Le règne animal nous fournit
eillement des pétrifications, et ce sont généralement les par-
solides des animaux, telles que les os et le test des coquilles,
peuvent conserver assez longtemps leur forme après avoir été
osés, pour que la matière pétrifiante les enveloppe et les pé-
re lentement.

I. Haidinger a partagé les épigénies en deux grandes divi-
s, les épigénies *anogènes*, et les épigénies *katogènes*, d'après
caractères à la fois chimiques et géologiques. Les épigénies
gènes sont celles qui sont formées, dans l'écorce minérale du
be, vers sa surface extérieure, et qui consistent en général
s un degré plus avancé d'oxydation produit par les agents
érieurs, l'atmosphère et les eaux superficielles. Là les métaux

s'oxydent : les oxydes s'hydratent ou passent à l'état de sels. On voit souvent dans ces épigénies un élément ou principe électro-négatif en déplacer un autre, qui présente le même caractère chimique à un degré moins élevé, ou qui est relativement moins stable. Ainsi, dans la transformation de l'azurite (carbonate bleu de cuivre) en malachite (carbonate vert), on voit un atome d'eau remplacer un atome d'acide carbonique. Les épigénies katogènes sont celles qui ont eu lieu vers le bas de l'écorce minérale par l'action des agents internes, tels que la chaleur souterraine et les émanations liquides ou gazeuses, venues de l'intérieur du globe. Elles consistent le plus ordinairement en des effets de réduction plus ou moins avancée, que subissent beaucoup d'espèces minérales, de composition assez complexe (1).

E. *Formes pseudocristallines.*

Il y a des formes, d'apparence cristalline, prismatoïdes ou pyramidales, qu'on prenait autrefois pour des cristaux, mais qui n'en sont point, et qui doivent leur configuration trompeuse à diverses actions physiques ou mécaniques. Parmi les faux cristaux (ou pseudo-cristaux), nous citerons : 1° les *formes capillaires* ou *filamenteuses*, produites mécaniquement, tantôt par voie ignée, comme lorsque des laves fondues de consistance visqueuse sont tirées en fils, à la manière du verre fondu (filaments d'obsidienne ou de verre volcanique), ou bien lorsque des filaments sortent, en se contournant, des pores d'une scorie métallique en partie refroidie, ou d'un minerai en partie fondu (filaments en crosse de cuivre ou d'argent natif) ; tantôt par voie humide et en vertu de la capillarité, à la surface des vases poreux, contenant des dissolutions salines.

2° Les *formes pseudoédriques* par compression mutuelle de globules mous (la dolomie globuliforme, appelée *miémite*).

3° Les *formes prismatiques* ou *pyramidales*, produites par le retrait sensiblement régulier qui a lieu dans les laves ou matières volcaniques fondues, quand elles sont homogènes, et se refroidissent lentement, ou bien dans les argiles, les marnes et autres pâtes terreuses, quand elles se dessèchent. Ces matières, par la dessiccation ou par le refroidissement, se fendillent en divers sens, et se partagent en fragments polyédriques qui ont

(1) Haidinger, *Annales de Poggendorff*, t. LXII, p. 161 ; 1844.

quand on en détache des fragments par la percussion. On examine ces surfaces adventices, qui sont le produit du choc d'un marteau, sous différents point de vue : 1° sous le rapport de leur éclat; 2° sous celui de leur texture; 3° sous celui de leur forme. Lorsqu'on veut reconnaître soit l'éclat, soit la couleur d'un minéral, ou bien la structure de sa masse, il ne faut pas s'en tenir à l'examen des surfaces extérieures et naturelles du minéral, que le frottement ou l'altération de l'air a pu rendre frustes : il faut toujours observer celles que fournit une cassure fraîche. Ces caractères dont nous venons de parler, se manifestent bien plus nettement par ce moyen; et c'est parce qu'on y a fréquemment recours, que l'on a été conduit à dire d'un minéral, qu'il a la cassure *vitreuse*, *résineuse* ou *cireuse*, pour exprimer le genre d'éclat qu'il manifeste dans sa cassure. On dit de même qu'il a la cassure *lamelleuse*, *fibreuse*, *grenue* ou *compacte*, pour indiquer le genre de texture que présente l'intérieur de la masse, mis à découvert par la cassure. Mais c'est surtout la forme propre aux surfaces de cassure que l'on étudie, et c'est là ce qui constitue l'essence de ce caractère. Ces formes, quand on les observe dans les variétés compactes et homogènes, présentent souvent, d'une espèce ou d'une variété principale à une autre espèce ou variété, des différences utiles à constater.

On dit qu'un minéral a la *cassure conchoïde*, lorsque la surface des fragments, étant concave ou convexe, est sillonnée de stries courbes et concentriques, semblables à celles que l'on voit sur les valves de certaines coquilles. Exemple : silex pyromaque; l'asphalte de Judée; l'obsidienne ou verre noir des volcans. La cassure *conique* ou *conoïde* est celle des minéraux dont les fragments, détachés par le choc, présentent, en relief ou en creux, la surface d'un cône ou d'un conoïde d'une certaine épaisseur. Cette cassure est plus rare que la conchoïde; mais celle-ci doit être considérée comme une simple dégénérescence de la cassure conique. On obtient d'ailleurs cette dernière assez facilement avec tous les corps compactes et bien homogènes : il suffit pour cela de frapper perpendiculairement à la surface extérieure, que je supposerai plane ou sphérique, un coup sec avec un marteau et un poinçon : le choc détermine à l'intérieur une fissure de forme conoïdale, qui se propage à partir du point qui a reçu le coup; et si l'échantillon n'est pas très-épais, cette fissure atteindra la surface opposée, et l'on verra se détacher un mamelon conique, de forme assez régulière. Un morceau d'a-

gate translucide, un bloc de grès luisant de Montmorency, se prêtent parfaitement bien à ce genre d'expérience.

On dit d'un minéral qu'il a la cassure *écailleuse* ou *esquilleuse*, lorsqu'il se détache en partie de la surface des fragments de petites écailles ou esquilles, semblables à cellès que l'on remarque dans la cassure d'un morceau de cire, ou bien d'un fragment d'os ou de bois. Exemple : l'agate et le pétrosilex.

On dit que la cassure est *plate*, lorsque le minéral se divise suivant des surfaces sensiblement planes. La cassure plate est raboteuse ou unie, selon que la surface de cassure présente ou non des inégalités.

La connaissance du mode de cassure propre à un minéral n'est pas seulement utile en minéralogie : il est des industries dont les procédés sont fondés sur elle. La manière dont on taille les pierres à fusil, ou dont on débite les pierres à meule, repose sur le genre de cassure qui est propre à l'une ou à l'autre de ces deux sortes de pierres dures.

II. CARACTÈRES PHYSIQUES
PROPREMENT DITS.

Les caractères dont nous allons maintenant nous occuper, sont tous ceux qui sont dus à quelque action physique, incapable d'altérer la composition moléculaire du minéral, et qui ne peuvent se constater qu'à l'aide d'une expérience, et, le plus souvent, à l'aide d'un instrument particulier. L'étude que nous en ferons confirmera pleinement ce que nous avons dit ailleurs, de l'influence exercée par la cristallisation sur les variations qu'ils subissent dans leur intensité, quand on les observe en divers sens dans le même corps. On leur trouve en général des valeurs différentes, quand on prend leur mesure dans telle direction ou dans telle autre; et la loi que suivent leurs variations est toujours conforme à la véritable symétrie du cristal, chaque propriété physique se montrant généralement différente dans les directions qui répondent à des axes ou files de molécules non semblables, tandis qu'elle s'offre toujours la même dans les directions qui correspondent à des lignes homologues. C'est ce que nous allons voir surtout pour les caractères de dureté, d'élasticité, de dilatabilité et de conductibilité, que l'on peut facilement étudier sur des faces ou dans des lames prises successivement en divers sens; et c'est là un fait général, qu'on peut étendre à toutes les autres propriétés physiques, et qui est la manifestation la plus claire de cet arrangement uniforme et symétrique de molécules, dans lequel consiste l'état cristallin.

CHAPITRE IX.

PROPRIÉTÉS DÉPENDANTES DE LA PESANTEUR ET DES FORCES MOLÉCULAIRES.

Parmi ces caractères physiques, nous étudierons d'abord ceux qui dépendent de la force de la pesanteur, et des actions moléculaires, comme la densité, la dureté et l'élasticité. On verra que le premier caractère, celui de la densité, est le seul qui paraisse échapper à la loi générale de variabilité, dont nous venons de parler; car, d'après la manière dont on la détermine, la densité étant prise par rapport au volume, on doit toujours arriver au même résultat, quelles que soient les portions de la masse sur lesquelles on opère. Mais, s'il était possible de séparer d'un cristal les diverses couches simples, ou les diverses files de molécules dont il se compose, afin de pouvoir mesurer la densité superficielle des couches, ou la densité linéaire des files, on trouverait certainement des différences, en passant d'une couche ou d'une file à une autre de direction différente, et par conséquent le caractère rentrerait dans la loi générale, et ne serait plus en opposition avec elle.

§ 1. *De la densité.*

Les minéraux de nature diverse présentent en général des différences de poids très-appréciables, quand on les pèse comparativement sous le même volume. Les rapports que ces différents poids ont avec celui d'un minéral, pris pour terme de comparaison, et qui est l'eau distillée, sont ce que l'on nomme les *densités*, ou les *poids spécifiques* des minéraux. D'après cela, pour déterminer le poids spécifique d'un minéral, il faut peser d'abord le corps, puis un volume d'eau égal au sien, et chercher combien de fois le premier poids contient le second. Pour avoir le poids de l'eau sous un volume égal à celui du corps, il n'est besoin que de peser une seconde fois celui-ci, en le tenant plongé dans l'eau, ce que l'on peut faire en l'attachant à un fil suspendu au-dessous d'un des bassins de la balance. Dans cette seconde pesée, le corps perdra, en vertu du principe d'Archi-

mède, une partie du poids qu'il avait dans l'air, et cette différence de poids perdue mesurera précisément le poids du volume d'eau que l'on cherche.

On peut aussi se servir, pour déterminer la pesanteur spécifique d'un corps, d'un petit flacon, à large ouverture, et fermé par un bouchon à l'émeri. Après avoir pesé le minéral dont on veut connaître la densité, on le place dans un des plateaux d'une balance, en mettant à côté de lui le flacon plein d'eau et fermé, et l'on pèse de nouveau ; puis, on enlève le flacon, on l'ouvre pour y introduire le minéral, qui, nécessairement, chassera un volume de liquide égal au sien ; et, après avoir fermé et essuyé le flacon, on pèse encore une fois. Le nombre obtenu pour cette troisième pesée, étant retranché de celui de la seconde, fera connaître le poids de l'eau expulsée, c'est-à-dire, le poids d'un volume d'eau égal au volume du minéral. Il n'y aura plus ensuite qu'à diviser par ce reste le poids même du minéral, fourni par la première pesée.

Le caractère de la densité est important en minéralogie, parce qu'il peut être déterminé avec une grande précision, et qu'il est véritablement spécifique, pourvu qu'on ne l'observe que dans les variétés les plus pures. Dans ce cas, il n'éprouve aucune variation notable, à moins que les échantillons examinés ne présentent de grandes différences dans leur mode d'aggrégation ; et c'est pour parer autant que possible à cette cause d'erreur que Beudant a proposé de réduire toujours les minéraux en poudre, afin de les ramener ainsi à des états d'aggrégation comparables. C'est entre 0 et 24 que sont comprises les densités de tous les minéraux solides, jusqu'à présent connus. Elles sont exprimées en nombres décimaux, et leur valeur est poussée ordinairement jusqu'aux millièmes. Les corps qui possèdent les plus fortes densités sont : l'iridium 23,640 ; le platine 21,5 ; l'or 19,36 ; et le tungstène 17,6. Les espèces minérales, de la classe des substances métalliques, ont généralement des densités supérieures à 5 ; et, à part quelques sels à bases de plomb ou acides métalliques, les espèces de la classe des pierres ont des densités inférieures à 5, et, pour le plus grand nombre, comprises entre 2 et 3.

§ 2. *De la dureté.*

Les corps naturels, en vertu de la cohésion qui réunit leurs particules, opposent une résistance plus ou moins grande à toute

action mécanique qui tend à les désunir ou à les déplacer. C'est ainsi qu'ils résistent plus ou moins à l'effort que l'on fait pour les rompre par le choc, pour les comprimer avec le doigt, pour les allonger ou les aplatir en lames, pour les faire vibrer par le frottement d'un archet, pour les rayer avec une pointe vive. Dans le langage ordinaire, on confond souvent sous le nom de dureté plusieurs de ces résistances diverses, bien qu'elles ne soient point en rapport les unes avec les autres. Il convient donc, pour éviter toute erreur, de fixer avec précision le sens qu'on doit attacher à ce mot en minéralogie. C'est la résistance qu'un minéral oppose à l'action de le rayer en ligne droite avec une pointe, telle qu'une aiguille d'acier, ou bien la partie anguleuse d'un autre minéral, qu'on passe avec frottement sur la surface du premier. Il arrive souvent dans ce cas que l'on enlève les files moléculaires que la pointe rencontre dans son mouvement, et que l'on produit une raie, un sillon plus ou moins large et plus ou moins profond. C'est donc la cohésion des files de molécules conjointes que l'on cherche, en opérant ainsi, à vaincre et en quelque sorte à mesurer, comme par le clivage on cherche à vaincre et à apprécier la cohésion des lames moléculaires superposées.

On pourrait employer, pour rayer les minéraux, des aiguilles de diverses natures, telles que des pointes de verre, d'acier ou d'une autre substance artificielle : mais, dans la pratique de la minéralogie, on a toujours recours aux parties anguleuses d'un minéral. On compare donc toujours les minéraux l'un avec l'autre, et l'on dit qu'un minéral est plus dur ou moins dur qu'un autre, suivant qu'il le raye ou qu'il est rayé par lui. Ainsi, le diamant est le plus dur de tous les minéraux, parce qu'il les entame tous et qu'il n'est entamé par aucun. Il y a une précaution à prendre pour pouvoir compter sur le résultat de l'épreuve. Il faut avoir soin de passer le doigt sur la surface frottée, pour enlever la poussière, et s'assurer que cette surface a été réellement rayée ; car, il pourrait se faire que la pointe dont on s'est servi fût fragile, et qu'en s'égrenant sous la pression, elle eût formé une traînée de poudre, qu'on pourrait être tenté de prendre pour une véritable rayure.

La dureté peut être étudiée soit dans les cristaux, soit dans les masses amorphes, à structure non cristalline.

A. *Dureté dans les cristaux.* — Quand on étudie la dureté dans les cristaux, on s'aperçoit aisément que, comme les autres caractères physiques, elle ne se montre pas au même degré dans

tous les sens : le résultat de l'épreuve varie en général dans le même cristal avec la direction des files moléculaires que l'on attaque ; seulement ces variations sont ordinairement fort petites, et difficiles à apprécier. Elles se manifestent dans trois cas différents : 1° sur des faces différentes d'un même cristal, comme on l'a depuis longtemps remarqué dans les cristaux de disthène, et dans ceux du gypse, où la face la plus tendre est celle du clivage le plus facile. 2° Sur la même face, mais dans des directions différentes : par exemple, pour les cubes de spath fluor, la dureté est plus grande parallèlement aux diagonales, que dans le sens des arêtes. Les différences dans ce cas peuvent aller du simple au double. 3° Sur la même face et sur la même ligne, suivant qu'on raye dans un sens ou dans le sens opposé. Cette dernière circonstance peut paraître assez extraordinaire, et l'on ne se serait pas attendu à voir la dureté varier en pareil cas. C'est cependant ce cas qui a été connu le premier, et signalé par Huyghens dans son *Traité de la lumière*. Ce physicien, à qui l'on doit de si belles observations sur le spath d'Islande, avait remarqué que dans les rhomboèdres de cette substance, la dureté variait dans le sens de la diagonale oblique, et qu'elle était plus grande quand on rayait en descendant du sommet vers l'angle inférieur du rhombe, et plus faible quand on rayait en remontant de l'angle inférieur vers le sommet. Si l'on répète cette expérience, en se servant d'une épingle comme frotteur, dans le premier cas, on n'obtiendra qu'une raie imperceptible, et dans le second, la rayure sera très-profonde. Huyghens se représentait les molécules du spath sous la forme de petits sphéroïdes lenticulaires très-aplatis, et les supposait disposés par couches parallèles, de manière que la direction de leurs petits axes concordât avec celle de l'axe du rhomboèdre. Dès-lors, toutes ces petites molécules devaient se présenter vers les faces obliques de ce rhomboèdre, imbriquées comme les tuiles d'un toit ou les écailles d'un poisson ; et Huyghens concluait de cette disposition, que dans la première manière de rayer le cristal, le couteau dont il se servait devait glisser sur le dos des écailles, sans tendre aucunement à les séparer, tandis que dans la seconde manière, il les prenait par-dessous, et tendait alors à les soulever et à les détacher (1). Cette explication fort plausible aurait à peine besoin d'être modifiée légèrement dans les termes, pour s'approprier convenablement à nos nouvelles idées sur la structure des cristaux.

(1) Huyghens, *Traité de la lumière* ; édition française, p. 95 ; Leyde, 1690.

Après Huyghens, c'est Muschenbroek qui s'est occupé du fait dont il s'agit; mais ce fait a été étudié surtout avec soin, dans ces derniers temps, par le docteur Frankenheim, par M. Seebeck de Berlin, et par M. Rudolph Franz (1). Le docteur Frankenheim cherchait à rayer les faces du cristal avec des aiguilles ou pointes anguleuses qu'il tenait à la main, et se contentait d'apprécier par le sentiment le degré de pression ou de vitesse nécessaire pour qu'il y eût un commencement d'effet, c'est-à-dire pour qu'on parvînt à saisir une première apparence de strie. On a songé à remplacer ces essais à la main par des épreuves faites avec des appareils auxquels on peut donner le nom de *scléromètres*, parce qu'ils sont destinés à fournir une mesure de la force nécessaire pour produire un commencement de strie, et par conséquent de la résistance que le cristal lui oppose; et c'est cette résistance qu'on appelle *dureté*. Muschenbroek a eu le premier l'idée de ce genre d'épreuves (voyez sa *Dissertation physique*, publiée en 1729, p. 669); le docteur Seebeck et M. Franz l'ont réalisé, chacun de son côté, et par des moyens à peu près identiques, et qui consistent à rendre semblables toutes les conditions de l'expérience, à l'exception d'une seule, dont les variations puissent se mesurer avec précision.

Les appareils qu'ils ont employés ont de l'analogie avec celui dont s'est servi Coulomb dans l'étude des lois du frottement. La plaque du minéral à rayer est maintenue horizontalement sur un châssis de bois solidement établi. La pointe, ou le fragment anguleux du cristal, qui doit servir de frotteur, est enchâssée dans une monture disposée verticalement au-dessus de la plaque, et elle est pressée de haut en bas par un poids. C'est la pointe qui se meut horizontalement sur le cristal immobile, ou bien le cristal lui-même, qui est entraîné avec le petit chariot qui le porte; et l'un ou l'autre de ces mouvements est produit par une corde horizontale, qui va s'enrouler sur une poulie de renvoi, et à l'extrémité de laquelle est suspendu un bassin, dans lequel on ajoute la quantité de poids nécessaire. Dans cette manière d'opérer, il n'y a que deux éléments dont on puisse disposer à volonté, savoir : le poids qui produit la pression et celui qui produit la vi-

(1) Dr Frankenheim, *De Crystallorum Cohæsione*; Breslau, 1829. Idem, *Die Lehre von der Cohæsion*, p. 328; Breslau, 1835. Dr Seebeck, *Mém. sur la dureté dans les cristaux*; *Hartmann's Jahrbücher der Mineralogie*, tome I, p. 123. Franz (Rudolph), Mém. sur le même sujet; *Annales de Poggendorff*, tome LXXX; 1850.

tesse. On fait en sorte qu'un de ces éléments soit constant dans toutes les épreuves comparatives, et que l'autre seul soit variable. En ayant recours à ces divers procédés, les observateurs que j'ai cités ont déjà pu constater plusieurs faits intéressants.

M. Frankenheim a reconnu que les variations de la dureté étaient toujours en rapport avec la symétrie du cristal, et qu'elles étaient aussi liées intimement aux directions des clivages les plus faciles. Ainsi, 1° la dureté est la plus faible sur les faces de clivage les plus nettes ; par conséquent, sur une pareille face, la dureté est inférieure à ce qu'on peut appeler la dureté moyenne ou absolue du corps. 2° Sur une face quelconque, non clivable, la dureté est la plus petite dans la direction perpendiculaire à la ligne d'intersection de la face avec celui des clivages obliques, qui est le plus facile ; elle est la plus grande, dans la direction parallèle à la même intersection. 3° Sur une ligne perpendiculaire à l'arête d'intersection d'un plan de clivage avec la face examinée, la dureté est plus faible, si l'on raye en allant vers l'angle obtus formé par les deux plans, et plus grande, si l'on raye au contraire en allant vers l'angle aigu. Si la face est coupée par plusieurs clivages, la direction de plus grande dureté se rapproche généralement de celui des clivages qui est le plus net.

Voici quelques-uns des résultats obtenus pour les substances les plus communes. Dans la fluorine (ou spath fluor), et sur les faces du cube, la plus grande dureté a lieu dans la direction des diagonales, et la plus faible dans celle des arêtes; sur les faces de l'octaèdre se montrent les plus petites variations dans la valeur du caractère.

Dans le sel gemme, et sur les faces du cube, c'est au contraire dans la direction des diagonales qu'on observe la plus faible dureté, et la plus grande a lieu parallèlement aux arêtes.

Dans la blende, sur les faces du dodécaèdre rhomboïdal, la dureté maxima répond à la grande diagonale du rhombe, et la dureté minima à la petite.

Dans le calcaire, sur les faces du rhomboèdre de clivage, le maximum de dureté a lieu dans la direction de la petite diagonale (ou diagonale oblique), quand on raye en descendant du sommet vers l'angle inférieur du rhombe; selon MM. Franz et Grailich, le minimum aurait lieu pour la même direction, mais en remontant vers le sommet; et la dureté moyenne répondrait à la grande diagonale. Les premiers observateurs, MM. Frankenheim et Seebeck, étaient arrivés à des résultats différents, en

ce qui concerne les rapports de dureté de cette dernière ligne avec la première.

Dans le quarz, sur les faces prismatiques, la dureté est plus grande dans la direction horizontale que dans la direction verticale; et dans celle-ci, on peut constater des différences, en rayant successivement de haut en bas et de bas en haut, ce qui s'accorde avec le caractère rhomboédrique de la structure cristalline.

Dans la topaze, les bases sont plus tendres que les pans, et sur ceux-ci, la direction de la dureté minima est parallèle à l'axe.

Dans le gypse, la face la plus tendre est celle du clivage le plus facile; il en est de même du disthène. Dans cette dernière substance, les différences sur la même face peuvent s'élever du simple au double. Entre les faces du premier clivage et du second, les variations sont telles, que la première face est rayée facilement par une pointe d'acier, tandis que la seconde ne peut l'être que par la topaze (1).

Ces observations prouvent combien il serait important que la physique dotât la minéralogie d'un instrument plus parfait que ceux qu'elle possède aujourd'hui, et qui serait propre à donner la mesure exacte des plus petites différences de la dureté dans les minéraux. Il en résulterait pour le cristallographe un moyen de plus d'étudier les variations de la structure des minéraux en différents sens, et de constater l'identité ou la non-identité des lignes ou des faces cristallines. L'invention d'un bon scléromètre n'intéresserait d'ailleurs que la physique des cristaux: elle aurait peu d'influence sur la détermination des espèces minérales. Dans la pratique de la minéralogie, on fait complètement abstraction des variations de la dureté, qui sont en général assez petites dans la même substance, et l'on considère cette propriété dans sa valeur moyenne, comme si c'était une valeur absolue. Pour évaluer, non pas rigoureusement, mais d'une manière approximative, les différences de dureté que nous offrent les minéraux, on a recours au moyen suivant. Supposons qu'après avoir formé la série de tous ces corps, rangés par ordre de du-

(1) Les artistes qui polissent les cristaux, en se servant pour les user de poudres de certains degrés de dureté, ont eu souvent l'occasion de remarquer que les différentes faces d'un même cristal se prêtent au polissage avec plus ou moins de facilité; et, par exemple, qu'il est beaucoup plus difficile de polir le spath d'Islande sur les faces de troncature des sommets que sur les faces de clivage du rhomboèdre.

reté, depuis le plus tendre, qui est le talc, jusqu'au plus dur, qui est le diamant, on choisisse dans cette série dix termes de comparaison, à distances telles l'un de l'autre qu'ils comprennent entre eux un grand nombre de minéraux, et qu'on puisse considérer leurs différences de dureté comme à peu près égales. En représentant alors les degrés de dureté de ces points fixes par les dix premiers nombres, on formera une échelle à laquelle on rapportera tout autre minéral, qui se trouvant nécessairement compris entre deux termes consécutifs de l'échelle, aura pour mesure de sa dureté un nombre fractionnaire. Ce moyen, employé d'abord par Romé de l'Isle, et ensuite par Mohs, est aujourd'hui généralement usité en minéralogie.

Voici les termes qui composent l'échelle comparative de dureté, avec les nombres qui les représentent :

Le talc.	1
Le gypse.	2
Le calcaire.	3
Le fluor..	4
L'apatite.	5
L'orthose.	6
Le quarz.	7
La topaze..	8
Le corindon.	9
Le diamant..	10

Si maintenant on veut exprimer le degré de dureté d'un autre minéral quelconque, de l'émeraude par exemple, on verra, en comparant ce minéral aux différents termes de l'échelle précédente, qu'il raye le quarz, et qu'il est rayé par la topaze : sa dureté est donc intermédiaire entre celles de ces deux termes, et peut être représentée par le nombre fractionnaire 7, 5, compris entre 7 et 8.

Il est quelques autres propriétés, dépendantes de la cohésion, et dont nous devons parler ici, pour les définir nettement, et empêcher qu'on ne les confonde avec la dureté, telle qu'on l'entend en minéralogie. On nomme *ténacité*, la résistance à la force mécanique qui tend à rompre un minéral, telle qu'un choc ou une traction. Un minéral très-tenace se brise avec la plus grande difficulté ; un minéral fragile ou facile à casser a très-peu de ténacité : la fragilité est donc opposée à la ténacité. Ces deux propriétés sont indépendantes de la dureté proprement dite. Il est

les substances très-tenaces, qui sont très-tendres (le talc); il en est de très-dures, qui sont fragiles (le diamant, le quarz).

Quand un minéral est doué d'un certain degré de dureté et le ténacité tout à la fois, et qu'il a en outre une cassure conchoïde à bords tranchants, il jouit de la propriété de donner les étincelles par le choc du briquet; exemple: le silex. L'étincelle étant produite par la combustion d'une particule d'acier létachée par le choc, il faut que le corps soit assez dur pour attaquer l'acier, et assez tenace pour que ses parties aiguës ne se brisent pas trop facilement par la percussion. Il est très-peu de substances qui réunissent toutes les conditions nécessaires, pour constituer une bonne pierre à fusil ou à briquet.

La *friabilité* est la propriété d'un corps, de s'égrener par le plus léger choc, ou de se désaggréger par la simple pression du doigt (exemple : la craie). La *flexibilité* est la faculté que possèdent certains minéraux de pouvoir être courbés sans se briser. es minéraux flexibles sont en même temps *élastiques*, s'ils reviennent à leur première forme, aussitôt que la force qui les a échis n'agit plus sur eux. La flexibilité et l'élasticité existent à n haut degré dans certains métaux; et quoique ces qualités paraissent incompatibles avec l'idée que l'on se fait communément es pierres, dans lesquelles la rigidité semble être une propriété aractéristique, cependant on les rencontre encore dans certaines substances pierreuses, dans les lames de mica, par exemple, dans les plaques de grès du Brésil, dans celles de marbre ccharoïde, dont on fait des chambranles de cheminée, et qui uvent fléchissent par leur propre poids; on peut même dire s'il n'est pas une pierre qui ne soit flexible et élastique lorsqu'on considère en grand. On a vu les colonnes et les tours de certaines églises osciller lorsqu'on mettait en branle de grosses cloches; on sait que le mouvement rapide d'une voiture pesamment chargée peut ébranler le sol et les bâtiments qu'il supporte; le phénomène des tremblements de terre nous conduit à admettre que la flexibilité et l'élasticité existent jusque dans les masses solides qui composent l'écorce terrestre.

La *ductilité* est la propriété que possèdent certains corps de laisser étendre par la pression ou par le choc, sans se briser se déchirer, et en conservant sensiblement la forme qu'on ur a imprimée. C'est ainsi que certains métaux, l'or, l'argent, fer, le cuivre, etc., s'allongent en fil lorsqu'on les force à passer par des trous d'un petit diamètre. Plusieurs se laissent apla-

tir et étendre sous le marteau, et prennent de cette manière la forme qu'on veut leur donner (l'or, l'argent, le cuivre, l'étain, etc.) : on dit qu'ils sont *malléables*. Quelques substances pierreuses présentent aussi une sorte de ductilité lorsqu'elles sont pénétrées d'eau : on dit alors qu'elles font pâte avec ce liquide; exemples : les argiles, les marnes.

§ 3. *De l'élasticité.*

L'avantage que nous regrettions tout-à-l'heure de ne pouvoir retirer encore de l'étude de la dureté dans les cristaux, pour en conclure les variations de leur structure, nous le trouvons jusqu'à un certain point dans un sujet de recherches toutes semblables, mais d'une précision bien plus grande, et dont l'idée est due à Savart. Ce physicien a étendu aux cristaux le mode d'expérience que Chladni avait appliqué à des plaques homogènes de verre, de bois ou de métal, et il a étudié, à l'aide des vibrations sonores, les variations de l'élasticité dans les lames cristallines qu'il extrayait d'un même cristal, en les prenant tantôt en un sens, et tantôt dans un autre.

On sait que Chladni a reconnu qu'on pouvait faire vibrer une plaque, en la fixant par son centre ou par un autre de ses points à l'aide des doigts ou d'une pince, et en la frottant sur les bords au moyen d'un archet; qu'on en tirait ainsi des sons purs, dont il était facile d'en prendre l'unisson sur un piano; et que pour chacun des sons qu'elle rend, la plaque se partage en parties vibrantes et en lignes de repos ou *lignes nodales*. On rend sensibles ces lignes nodales, en saupoudrant la plaque d'une légère couche de sable, avant de la faire vibrer. Aussitôt qu'elle entre en vibration, le sable est repoussé par les parties vibrantes, et va s'accumuler sur les lignes en repos, dont il dessine parfaitement la forme. On a donc ainsi deux caractères parfaitement déterminables, et qui s'accompagnent toujours l'un l'autre : un son appréciable, et une figure acoustique bien définie, et qu'on peut relever avec soin. La même plaque peut donner plusieurs sons, à chacun desquels répond une figure déterminée, dont l'observateur fixe la position, pour ainsi dire, à volonté, en choisissant le point d'ébranlement, et surtout le point touché par les doigts ou par la pince, et par lequel passera nécessairement une des lignes nodales. Quand la plaque est polygonale, le double phénomène qu'on observe dépend non-seulement de la struc-

ture et de l'état élastique de la plaque, mais encore de sa forme. Pour que les observations soient comparables, et pour n'avoir que les variations causées par la structure, il faut ramener toujours les plaques à une même forme, par exemple, celle d'un disque circulaire.

L'ensemble des figures que peut donner une plaque circulaire, peut se ramener à trois types différents : un système de lignes droites diamétrales, un système de lignes circulaires concentriques, et un système composé de branches hyperboliques. On obtient le premier système, en touchant le centre du disque; et l'un des deux autres, suivant la nature de la plaque, en fixant un des points de la surface, compris entre le centre et la circonférence.

En opérant sur des disques circulaires, Savart a trouvé le moyen de reconnaître si la substance examinée était un corps cristallisé, à élasticité variable, ou bien un corps amorphe, à élasticité constante, comme le verre. Dans les deux cas, on obtient aisément, en pressant le centre avec les doigts, un système de deux lignes diamétrales rectangulaires : mais, dans le cas d'un disque de verre, les deux lignes se forment toujours à 45° du point d'ébranlement, quel que soit le point de la circonférence qu'on ait attaqué avec l'archet; par conséquent, en changeant ce point, on peut faire en sorte que les lignes nodales se déplacent; elles n'ont point de position absolument fixe, et on peut leur faire parcourir successivement toute l'étendue du disque. Il n'en est pas de même, si la plaque est cristallisée. Le son qui annonce un mouvement vibratoire régulier, ne sort pas toujours, pour tous les points d'ébranlement qu'on a choisis, et quand il se produit, on remarque que les lignes nodales qui l'accompagnent, se montrent toujours aux mêmes places : elles ont donc une position fixe, déterminée par l'élasticité même de la plaque. Ainsi, dans les cristaux, il n'existe aucune plaque, dans laquelle une même figure nodale puisse se placer dans toutes les directions successivement.

Lorsque le disque circulaire est cristallisé, on obtient, selon le sens dans lequel on a pris la plaque, tantôt un système de branches hyperboliques, avec un système de lignes diamétrales, qui se confond avec les axes de l'hyperbole, tantôt deux systèmes de lignes hyperboliques, correspondant à des sons différents, et ayant des positions invariables, tantôt enfin, mais plus rarement, deux systèmes de lignes droites diamétrales, sans lignes hyperboliques.

Les recherches de Savart ont porté principalement sur les cristaux de quarz-hyalin et de calcaire spathique. Voici quelques-uns des résultats qu'il a obtenus pour le quarz.

1° Les plaques parallèles aux faces de la pyramide ne sont identiques, sous le rapport de l'élasticité, que trois à trois, et c'est sur la symétrie ternaire que se règlent les variations de cette propriété. L'élasticité n'est pas la même pour les plaques parallèles à deux faces adjacentes, bien qu'elles présentent l'une et l'autre un système rectangulaire, et un système hyperbolique. Celles qui sont prises parallèlement aux faces P du rhomboèdre fondamental, et que nous appellerons les faces clivables, parce que c'est à elles que correspondent les traces de clivage qu'on observe quelquefois dans ce minéral, ont un système diamétral placé sur les diagonales des faces du rhomboèdre P, et qui est donné par le son le plus grave; l'intervalle des deux sons est celui de *ut* à *mi*, c'est-à-dire un intervalle de tierce majeure. Les plaques parallèles aux faces non clivables (*z*), qui alternent avec les précédentes, ont aussi un système diamétral, semblablement placé, et un système hyperbolique : mais ici, les sons ont des valeurs différentes, et s'offrent de plus dans un ordre inverse; c'est le son le plus aigu qui accompagne le système rectangulaire, et par conséquent le plus grave qui répond au système hyperbolique. En outre, la courbure des branches de l'hyperbole et la position des sommets ne sont plus les mêmes que pour les premières plaques. Le son grave est un *ré* ♭, le son aigu un *sol* ♯, en sorte que l'intervalle des deux sons est ici une quarte superflue.

Cette observation a de l'importance au point de vue de la minéralogie : elle sert à confirmer la détermination du système cristallin du quarz, sur la nature duquel on a pu hésiter, parce que la forme fondamentale ne paraissait pas suffisamment indiquée par le clivage, qui manque presque toujours, ni par les formes secondaires qui rappellent bien plutôt le système dirhomboédrique, que le système rhomboédrique proprement dit. Aussi, Haüy avait-il d'abord rapporté les formes du quarz à un dodécaèdre à triangles isoscèles; et, plus tard, il a adopté pour type fondamental le rhomboèdre P, forme hémiédrique de ce même dodécaèdre. Les recherches de Savart s'accordent parfaitement avec cette dernière détermination, et conduisent à rejeter définitivement la première : car, il est évident que, si les formes du quarz étaient holoédriques, les six faces de la pyra-

mide terminale devraient être identiques sous tous les rapports, et par conséquent avoir la même élasticité.

2° Les plaques menées par l'axe et par une des arêtes du prisme, et qui sont par conséquent parallèles aux pans, donnent un système de lignes diamétrales et un système hyperbolique. Le son qui accompagne le premier, est le plus aigu (*fa*) ; celui qui accompagne le système hyperbolique est le plus grave (*ré* ♯).

3° Les plaques menées par l'axe, perpendiculairement aux faces P et aux pans du prisme, ne donnent que deux systèmes hyperboliques, à peu près semblables, mais correspondant à des sons différents, et dont les axes principaux se croisent sous un angle de 51°.

4° Enfin, les plaques perpendiculaires à l'axe ne donnent que deux systèmes de lignes diamétrales, placés à 45° l'un de l'autre. Les sons qui les accompagnent sont sensiblement les mêmes: l'un étant un *ré*, et l'autre la même note très-légèrement augmentée. Il suit de là que l'élasticité d'une pareille plaque est à peu près la même dans toutes les directions autour du centre, sans être cependant rigoureusement égale (1).

Savart a cherché à déterminer les directions des axes de plus grande, de plus petite et de moyenne élasticité, dans les cristaux qu'il a soumis à l'expérience. Il a trouvé que, dans le quarz, les axes de plus grande et de moyenne élasticité sont situés dans chacune des trois faces que nous avons supposées clivables, l'axe de plus grande élasticité coïncidant avec la diagonale oblique des faces du rhomboèdre, et l'axe d'élasticité moyenne avec la diagonale horizontale. L'axe de plus petite élasticité est dans un plan diagonal, et dirigé perpendiculairement aux deux au-

(1) L'élasticité dont il est question dans ce paragraphe, est celle qu'on peut appeler *élasticité acoustique*, et qui appartient aux molécules du milieu pondérable. Mais dans ce milieu se trouve interposé un second milieu (celui de l'éther) auquel on attribue la production des phénomènes lumineux et dont les molécules sont douées d'une élasticité propre, qu'on peut distinguer de la première, en la nommant *élasticité optique*. Le milieu éthéré doit être subordonné dans sa constitution à celle du milieu cristallisé qu'il pénètre; mais, quelle que soit l'influence de ce dernier, elle ne paraît pas aller jusqu'à rendre parfaitement identique, sous le rapport de l'élasticité, la loi constitutive des deux milieux; et l'éther se distingue généralement par sa tendance à un état plus simple et plus uniforme. Il résulte, en effet, des expériences de M. Savart, que, dans les cristaux rhomboédriques, l'élasticité acoustique varie dans les différentes directions autour d'un même point d'une plaque perpendiculaire à l'axe, et que les plaques parallèles à l'axe n'offrent pas toutes le même état élastique, tandis que, comme nous le verrons plus loin, l'observation et la théorie établissent de concert cette identité pour les plans correspondants du milieu éthéré.

tres. Dans le calcaire, les choses se passent à peu près comme dans le quarz, si ce n'est que l'axe, qui coïncide avec la diagonale oblique, est l'axe d'élasticité *minima*, au lieu d'être celui d'élasticité *maxima*. Dans les deux substances, la situation des axes est en rapport évident avec la position des plans de clivage (1).

CHAPITRE X.

PROPRIÉTÉS DÉPENDANTES DE L'ACTION DE LA CHALEUR.

§ 1. *De la dilatabilité.*

La température change le volume des cristaux ; elle peut aussi changer la forme cristalline, en altérant le rapport de ses axes, mais elle ne détruit pas la structure, et laisse subsister le caractère essentiel de la cristallisation, en ce que toutes les molécules qui, avant le changement de température, se trouvaient sur une même droite ou sur un même plan, se retrouvent encore après sur une droite ou sur un plan : seulement la direction de cette droite ou de ce plan peut n'être plus la même. L'expérience le démontre : s'il n'en était pas ainsi, les faces et les plans de clivage des cristaux subiraient constamment une courbure par un abaissement ou un accroissement considérable de température.

Si l'on soumettait un cristal à une compression égale en tous sens, en appliquant en chaque point de sa surface une pression normale de même valeur, il éprouverait sans doute les mêmes modifications dans sa structure moléculaire, que s'il était exposé à un abaissement de température; et réciproquement, l'action de la chaleur, quand la température est croissante, peut être considérée comme une tension, qui agirait également et perpendiculairement en chaque point de la surface.

Cette dernière action est la seule dont les effets aient été soumis jusqu'à présent à l'expérience, et, comme nous l'avons dit page 64, c'est à M. Mitscherlich que sont dues les seules observations de ce genre que possède la physique des cristaux. Ce savant a reconnu que les cristaux, quand on les chauffe, se di-

(1) Voyez *Annales de Physique et de Chimie*, tome IV, 1829, p. 113.

atent toujours également dans toutes les directions des axes ou ignes qui sont cristallographiquement identiques, et, en généal, inégalement dans les directions des axes de valeur différente. Il suit de là que, dans le système cubique, où tous les axes principaux ont la même valeur, la dilatation doit être uniorme, et par conséquent tous les cristaux qui se rapportent à ce ystème doivent seulement augmenter de volume par l'action le la chaleur, sans changer de forme, puisque les dimensions elatives des axes principaux restent les mêmes. Il n'en est plus insi dans les cristaux, qui se rapportent aux autres systèmes cristallins, et où il y a lieu de distinguer des axes de valeur différente : on y observe des directions dans lesquelles la dilatation néaire est inégale, des directions de plus grande, comme de lus petite dilatation. Dans ces cristaux, les files qui composent e réseau cristallin intérieur, n'éprouvent pas seulement des hangements dans les grandeurs relatives de leurs intervalles noléculaires, elles peuvent en même temps changer de posiion les unes par rapport aux autres, en sorte que certains anles de la forme extérieure deviennent plus grands, tandis que l'autres diminuent. Toutefois, parmi le grand nombre des files noléculaires qui se croisent dans le cristal, il en est toujours quelques-unes qui n'éprouvent pas ce changement de direction, t dont la position demeure invariable pendant tous les changeaents de température : on a proposé de donner à ces lignes priilégiées le nom d'*axes thermiques*. Ils sont les mêmes que les xes cristallographiques, dans tous les cristaux des quatre premiers systèmes, où les axes sont rectangulaires (1).

M. Mitscherlich a étudié la dilatation des cristaux dans deux spèces du système cubique (le spinelle et la blende), dans plusieurs espèces du système rhomboédrique (le calcaire, la dolomie, le fer spathique), dans une espèce du système orthorhombique (l'arragonite), et dans une autre du système klinorhombique e gypse, ou sulfate de chaux hydraté). Il a reconnu que les ristaux du système cubique se comportent à l'égard de la chaeur, comme le font les corps amorphes : ils éprouvent en tous ens la même dilatation.

Dans le calcaire spathique (ou spath d'Islande), où l'angle diè-

(1) Selon M. Neumann, ces axes thermiques se confondent toujours avec les es d'élasticité optique, dont il sera question un peu plus loin. Voyez dans s *Annales de Poggendorff*, tome XXVII, p. 240, 1833, un Mémoire de ce sant sur les axes thermiques, optiques et cristallographiques des cristaux.

dre, vers les sommets, est de 105° 5' à la température ordinaire, il a trouvé que cet angle diminue de valeur par un accroissement de température, tandis que l'angle latéral augmente. Pour un accroissement de chaleur de 100°, le premier angle n'est plus que de 104° 56' 25"; il a baissé de 8' 35". L'excès d'allongement de l'axe vertical, sur les trois axes horizontaux, déduit de ces mesures goniométriques, est de 0,00342. Or, pour la même augmentation de température, la dilatation cubique du cristal n'est que de 0,00196, comme il résulte d'une expérience particulière, faite en commun par MM. Mitscherlich et Dulong. Il faut donc que la valeur relative de l'axe secondaire ait diminué, pendant que celle de l'axe vertical augmentait. M. Mitscherlich a tiré de là cette conséquence, que, tandis qu'il y avait dilatation réelle dans un sens, il devait se produire une contraction absolue dans l'autre (1).

Dans la dolomie (double carbonate de chaux et de magnésie), l'angle dièdre des arêtes culminantes diminue, dans les mêmes circonstances de température, de 4' 6"; dans le fer spathique rhomboédrique, la diminution n'est que de 2' 22". Dans d'autres substances du même système, dans le quarz par exemple, les résultats sont inverses : l'angle dièdre des faces culminantes devient plus obtus, et la direction de plus grande dilatation est celle qui est perpendiculaire à l'axe.

Dans l'arragonite, qui cristallise en prisme droit à base rhombe, les trois axes rectangulaires éprouvent tous ensemble une dilatation réelle, mais de valeur différente pour chacun d'eux. Dans le gypse, substance du système klinorhombique, la valeur relative de l'axe qui est perpendiculaire au clivage le plus facile diminue, par un accroissement de température. Il y a donc encore là contraction dans un sens, tandis qu'il y a dilatation réelle dans le sens des autres axes (2).

(1) Et en effet, la mesure directe, au moyen du sphéromètre, de la dilatation linéaire de deux plaques de spath, l'une parallèle à l'axe et l'autre perpendiculaire, a donné pour 100° la dilatation relative de la première égale à 0,00321. En comparant ces plaques avec des lames de verre, d'une épaisseur égale et d'une dilatation connue, M. Mitscherlich a reconnu que dans le spath il y avait dans le sens de l'axe une dilatation absolue de 0,00286, et perpendiculairement à l'axe, une contraction absolue de 0,00056, ce qui donne pour la dilatation cubique 0,00174, nombre presque égal à celui que Dulong avait trouvé.

(2) Voyez le Mémoire de Mitscherlich sur la dilatation des cristaux, parmi ceux de l'Académie royale de Berlin, pour 1825, et dans les *Annales de Chimie et de Physique*, tome XXXII, p. 111.

§ 2. *De la conductibilité.*

La conductibilité est la propriété dont jouissent les corps de transmettre dans toute leur masse, plus ou moins lentement ou rapidement, mais avec une vitesse appréciable, la chaleur qu'on communique à l'une de leurs extrémités. Cette propagation a lieu successivement, de molécule en molécule. On nomme bons conducteurs, les corps chez lesquels cette transmission est facile et rapide; mauvais conducteurs, ceux qui propagent la chaleur avec lenteur et difficulté.

Les gaz sont les plus mauvais conducteurs que l'on connaisse; les liquides sont aussi très-peu conducteurs : on avait même cru qu'ils ne l'étaient pas du tout; mais la propagation directe de la chaleur dans les liquides a été non-seulement constatée pour la première fois par les recherches de M. Despretz; mais cet habile physicien a encore reconnu le premier les lois de cette propagation (1). On lui doit pareillement d'importantes recherches sur la conductibilité des corps solides, pour lesquels il a vérifié la loi mathématique de propagation qu'avait indiquée Lambert.

Parmi ces derniers corps, auxquels appartiennent les minéraux proprement dits, les métaux sont en général de bons conducteurs; mais il existe entre eux, sous ce rapport même, d'assez grandes différences. L'or, l'argent et le cuivre possèdent la faculté conductrice au plus haut degré; tandis que, relativement à ces métaux, le platine et le fer sont d'assez faibles conducteurs. Parmi les corps non métalliques, le charbon, le soufre, les pierres de diverses espèces conduisent très-mal la chaleur.

On doit s'attendre naturellement à ce que la chaleur ne se propage pas avec la même vitesse en tous sens à l'intérieur des corps cristallisés. En général, la conductibilité est inégale dans les cristaux, comme M. de Sénarmont l'a démontré, en appliquant aux lames cristallines un procédé d'expérimentation analogue à celui que Ingenhouz avait appliqué à des tiges métalliques de diverses natures. M. de Sénarmont, en un point donné d'une lame cristalline, établit un foyer permanent de chaleur, qui exerce son action concentriquement autour de ce point, et il constate les effets de la propagation simultanée en différents sens, à l'aide d'un moyen physique qui rend immédiatement sensible l'arrivée d'une même température à diverses distances.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, tome LXXI, p. 206.

Dans une plaque à faces parallèles, de quelques millimètres d'épaisseur, on perce vers le centre un trou conique, par lequel on fixe cette plaque sur une tige métallique, effilée en cône à son extrémité, et redressée en équerre à quelques centimètres de distance de sa pointe. La surface supérieure de la plaque est polie et recouverte d'une couche mince de cire vierge. On chauffe à la flamme d'une bougie un des points du long bras de la tige, l'échauffement se propage bientôt jusqu'à la pointe, qui devient pour la lame une source centrale et rayonnante de chaleur. Mais, pour que cette source agisse seule, on enfile dans le bras horizontal de la tige un écran vertical, qui abrite la lame contre le rayonnement direct de la flamme. A mesure que la chaleur de la tige se transmet à la plaque et se propage autour du point central, la cire se fond, et la courbe qui sépare la partie déjà fondue de la partie encore solide, dessine à chaque instant le contour de la propagation d'une égale chaleur dans toutes les directions à la fois.

Cette ligne, qui est marquée par un bourrelet très-visible, est ce que l'on appelle une *courbe isotherme*. Si la propagation est la même en tous sens, cette courbe est un cercle; dans le cas d'une propagation inégale, elle a un centre et des rayons inégaux comme l'ellipse, et elle fait reconnaître aisément les *maxima* et les *minima* de conductibilité, qui se montrent généralement dans la direction des lignes de symétrie de la lame cristalline. Si maintenant on imagine que l'on ait déterminé la courbe isotherme pour chacune des lames qu'on pourrait extraire d'un cristal, en menant des sections dans tous les sens autour d'un même point, la réunion de toutes ces courbes isothermes formera une surface, qu'on pourra appeler de même *surface isotherme*, parce qu'elle indique comment a lieu, dans la masse du cristal, la propagation d'une chaleur égale dans tous les sens autour d'un même point. Dans les milieux homogènes à conductibilité uniforme, cette surface est une sphère; dans ceux à conductibilité inégale, cette surface est un sphéroïde, qui dans certains cas peut être un ellipsoïde de révolution, dans d'autres cas un ellipsoïde à axes inégaux. Voici les principaux résultats des expériences de M. de Sénarmont, qui se montrent parfaitement d'accord, dans chaque système cristallin, avec la symétrie qui le caractérise.

1° Dans les cristaux du système régulier, la conductibilité est égale en tous sens, toutes les courbes isothermes sont des cercles,

st la surface isotherme, une sphère concentrique à la source de chaleur.

2° Dans les cristaux des systèmes rhomboédrique et quadratique, où il y a un axe principal, la conductibilité a une valeur *maxima* ou *minima* parallèlement à l'axe de figure; elle est égale dans toutes les directions normales à cet axe; et le sphéroïde de conductibilité est un ellipsoïde de révolution autour du même axe.

3° Dans les cristaux du système orthorhombique, caractérisés par trois axes de symétrie rectangulaires, la conductibilité rend trois valeurs principales suivant les directions de ces axes, t la surface isotherme est un ellipsoïde à trois axes inégaux qui ncident avec les axes du cristal.

4° Dans les cristaux du système klinorhombique, la conductibilité prend trois valeurs principales, suivant des directions ctangulaires, dont une coïncide toujours avec celui des axes istallographiques qui est perpendiculaire aux deux axes; et la rface isotherme est un ellipsoïde à trois axes inégaux, dont un ul a une position déterminée par la forme cristalline.

5° Dans les cristaux du dernier système, la surface isotherme t encore un ellipsoïde à axes inégaux; mais la position de ces tes n'est nullement annoncée par la forme extérieure (1).

§ 3. *De la diathermie.*

La propagation de la chaleur n'a pas lieu seulement d'un corps un autre, au contact et de molécule à molécule, elle a lieu encore à distance au travers du vide, de l'air et même de différents orps solides, comme celle de la lumière, c'est-à-dire que sa ansmission dans ce cas est rapide, presque instantanée, et ous forme de rayons, qu'on appelle rayons de chaleur, ou *ayons calorifiques*. Cette chaleur rayonnante est hétérogène, omme les rayons de la lumière solaire : elle se compose de plusieurs espèces de rayons de propriétés différentes, et elle subit ans son passage à travers les corps, les mêmes modifications ue la lumière, c'est-à-dire qu'elle présente les mêmes phénomènes d'absorption, de réfraction, de dispersion, et que, comme

(1) Voyez les deux Mémoires de M. de Sénarmont sur la conductibilité des ristaux par la chaleur. (*Comptes-Rendus de l'Acad. des Sciences*, tome XXV, . 459 et 707.)

elle, elle éprouve dans les milieux cristallisés, la réfraction double et la polarisation.

La diathermie est la propriété que possèdent certains corps de livrer passage aux rayons calorifiques, ou d'en transmettre au moins une partie au travers de leur masse; c'est une sorte de transparence des corps pour la chaleur. On nomme *diathermanes*, ceux qui jouissent de cette propriété, et *athermanes*, ceux qui ne laissent passer aucun rayon calorifique, comme les métaux par exemple, et qui sont en quelque sorte opaques relativement à la chaleur. La transparence pour la chaleur paraît être sans relation aucune avec la transparence pour la lumière : l'alun le plus limpide est très-peu diathermane, il est presque opaque pour la chaleur; tandis que le quarz très-enfumé et à peu près opaque est diathermane à un degré assez marqué.

Parmi les corps qui sont diaphanes ou transparents pour la lumière, beaucoup sont incolores, parce qu'ils laissent passer sensiblement la même fraction des rayons lumineux de toute espèce, qui se présentent pour les traverser. Les autres sont colorés, parce qu'ils laissent passer certains rayons en plus grande proportion que les autres. D'après les recherches de Melloni, un seul corps jouirait, à l'égard de la chaleur, de la propriété qui caractérise les premiers : il laisserait passer avec la même facilité les rayons calorifiques de toute espèce, et, sous ce rapport, serait, pour ainsi dire, sans coloration : ce corps est le sel gemme; il est complètement diathermane. Tous les autres absorbent en proportions très-inégales les rayons calorifiques de différentes natures : ils sont diversement colorés par rapport à la chaleur. Le quarz enfumé, le mica noir opaque, sont des corps diathermanes, ainsi que le carbonate de plomb, le spath d'Islande et le gypse. Le sulfate de cuivre peut être considéré comme athermane.

§ 4. *De la capacité pour la chaleur. — Chaleurs spécifiques des minéraux.*

Tous les corps n'ont pas la même capacité pour la chaleur, c'est-à-dire qu'ils ont besoin d'absorber des quantités de chaleur différentes pour éprouver, à poids égal, un même accroissement de température. La capacité d'un corps pour la chaleur se mesure par la quantité de chaleur que doit recevoir l'unité de poids pour s'élever d'un degré en température. Cette quantité déterminée de chaleur se nomme la *chaleur spécifique* du corps. On

prend pour une unité des chaleurs spécifiques, celle de l'eau. Les chaleurs spécifiques des corps simples varient entre trois et vingt centièmes. Celle du soufre est de 0,20259, et celle du platine de 0,03243. Dulong et Petit ont démontré, par un grand nombre d'expériences, qu'il existait une relation très-simple entre les chaleurs spécifiques des corps simples et leurs poids atomiques (1). Cette loi consiste en ce que les chaleurs spécifiques de ces corps sont en raison inverse des poids atomiques, en sorte que si l'on multiplie un quelconque de ces poids atomiques par la chaleur spécifique correspondante, on doit avoir pour produit un nombre constant. C'est en effet ce que l'on peut vérifier au moyen de la table suivante, qui est due aux recherches de M. Regnault.

(1) Voyez plus loin ce que l'on entend par le poids atomique d'un corps, et comment on le détermine.

NOMS des substances.	CHALEURS spécifiques, celle de l'eau étant 1.	POIDS atomiques, celui de l'oxygène étant 100.	PRODUIT.
Plomb.	0,0314	1294,50	40,647
Platine.	0,03243	1233,50	39,993
Or.	0,03244	1243,01	40,328
Mercure.	0,03332	1265,82	42,149
Tungstène.	0,03636	1183,00	43,002
Antimoine.	0,05077	806,45	40,944
Tellure.	0,05157	801,76	41,549
Iode.	0,05412	789,75	42,703
Étain.	0,05623	735,29	41,345
Cadmium.	0,05669	696,77	39,502
Palladium.	0,05927	665,90	39,468
Molybdène.	0,07218	598,52	43,163
Arsenic.	0,0814	470,04	38,261
Sélénium.	0,0837	494,58	41,403
Cuivre.	0,09515	395,69	37,849
Zinc.	0,09555	403,23	38,526
Cobalt.	0,10696	368,99	39,468
Nickel.	0,10863	369,68	40,160
Fer.	0,11379	339,21	38,597
Phosphore.	0,1889	196,14	37,024
Soufre.	0,20259	201,16	40,754

MM. Neumann et Regnault ont cherché à étendre la loi de Dulong et Petit aux corps composés, et ils sont parvenus à constater le résultat suivant : les chaleurs spécifiques des corps composés, de même formule atomique et de constitution chimique semblable, comme les corps isomorphes, sont entre elles, à très-peu près, en raison inverse des nombres qui représentent les poids atomiques de ces composés (1). Les tables de chaleurs spécifiques qui ont été données par ces auteurs, font voir que ce caractère change, pour la même substance chimique, avec la constitution physique du corps ; ainsi, la chaleur spécifique du diamant n'est que de 0,1469, tandis que celle du graphite est de 0,219.

§ 5. *De la fusibilité et de l'action des dissolvants sur les cristaux.*

L'action, soit mécanique, soit physique, de la chaleur, des dissolvants et des corrosifs, sur les surfaces des cristaux, n'est pas la même en tous leurs points, et les variations qu'elle éprouve s'accordent encore avec tout ce que nous avons dit jusqu'ici de l'influence des modifications de la structure sur celles des propriétés physiques ; cette influence paraît s'étendre jusqu'aux actions chimiques elles-mêmes, et se manifeste surtout lorque ces actions s'exercent lentement et avec une faible intensité. La fusibilité par la flamme du chalumeau éprouve des variations sensibles dans quelques minéraux cristallisés, suivant que le dard de la flamme est dirigé parallèlement ou normalement à certaines faces. Le gypse laminaire, par exemple, quand on l'attaque par le plat de ses lames, se calcine sans se fondre ; si on l'attaque par la tranche, il subit une fusion préalable, et se calcine après.

La dissolubilité par l'action lente de l'eau, des acides ou des alcalis étendus, est dans le même cas. Certains cristaux opposent une résistance très-inégale à la force dissolvante de ces liquides, par leurs différents côtés, par celles de leurs parties qui sont géométriquement et physiquement différentes. Les premières observations de ce genre sont dues à un physicien anglais, Fr. Daniell, qui a eu l'heureuse idée d'analyser, au moyen de dissolvants convenablement choisis, la structure de plusieurs corps

(1) Voyez Neumann, *Annalen von Poggendorff*, 1831, n° 9, et Regnault, *Annales de Chimie et de Physique*, tome LXXIII, p. 5, et tome I (3e série), p. 128.

cristallisés, en les forçant à manifester eux-mêmes leur véritable forme. Il avait remarqué que des corps, intérieurement cristallisés, mais sans forme bien déterminée à l'extérieur, comme des masses informes d'alun du commerce, de borax, de nitre et de quelques autres sels solubles, étant soumis pendant un temps plus ou moins long à l'action lente de l'eau, finissaient par prendre une forme cristalline régulière, laquelle se produisait aux dépens du bloc primitif, peu à peu dégrossi par l'action en quelque sorte élective du dissolvant. Il a étendu ce moyen d'observation à des carbonates, qu'il faisait mordre par le vinaigre; à différents métaux fondus, qu'il traitait par l'acide nitrique plus ou moins affaibli; et enfin au quarz hyalin, qu'il attaquait par l'acide fluorhydrique étendu (1).

M. Leydolt s'est servi de ce moyen pour étudier la série cristalline du quarz, qui offre des modifications si intéressantes, et, en le mettant en usage, il est parvenu à provoquer la formation de nouvelles facettes sur les cristaux ordinaires de ce minéral (2).

Enfin, M. Widmanstädten l'a employé, de son côté, pour étudier la structure des fers météoriques, qu'on trouve en masses à structure cristalline, mais le plus souvent amorphes. Il est parvenu à faire naître à la surface de ces masses, préalablement bien décapée et bien polie, des stries parallèles, se croisant en divers sens, et en rapport de direction avec les plans de clivage du fer natif, ce qui lui a permis de juger de la forme cristalline de cette espèce. Pour amener ce résultat, il suffit de faire mordre légèrement cette surface par de l'acide nitrique étendu, ou plus simplement encore, de l'abandonner à elle-même, après l'avoir polie, dans un endroit humide, et de lui laisser prendre un commencement de rouille. Il n'est pas rare de rencontrer, dans les collections de minéralogie, des lames de fer météorique, qui ont subi ce genre de préparation, et qui offrent un croisement de stries, évidemment parallèles aux faces d'un octaèdre régulier (3).

(1) Voyez le Mémoire de Fr. Daniell, qui a pour titre : *On some phenomena attending the process of solution and their application to the laws of crystallisation*, dans le *Journal des Sciences et des Arts*, de l'Institution royale de la Grande-Bretagne.

(2) *Ueber eine neue Methode, die Structur und Zusammensetzung der Krystalle zu untersuchen*, par Leydolt; tome XV des *Mémoires de l'Académie des Sciences de Vienne*.

(3) Voyez le Mémoire de Widmanstædten, dans les *Beitræge zur Geschichte und Kenntniss meteorischer Stein-und Metallmassen*, par de Schreiber, p. 70.

L'ensemble de faits, que nous venons de parcourir, pourrait déjà paraître bien suffisant pour établir la proposition que nous avions énoncée, en commençant cette étude des propriétés physiques des minéraux, savoir que, dans les cristaux, elles éprouvent toutes des variations qui s'accordent toujours avec la marche de la structure, de telle sorte que, si la loi de la structure est connue d'avance, on peut pressentir celle que suivront ces propriétés, avant d'en avoir fait l'expérience; et que, réciproquement, si la loi de ces propriétés est donnée d'abord par l'observation directe, on peut en déduire, comme conséquence, celle de la structure, et arriver par cette voie à la connaissance du système cristallin. J'insiste de nouveau sur cette corrélation remarquable, sur cette subordination constante des caractères les uns aux autres; car rien n'est plus important à signaler, en histoire naturelle : c'est elle, en effet, qui nous permet souvent de conclure d'un caractère à un autre, de juger d'une propriété cachée ou difficile à reconnaître, par une autre plus apparente ou plus accessible à nos recherches.

Au reste, le plus bel exemple qu'on puisse citer de ces rapports entre les modifications de la forme et de la structure cristalline, et celles des propriétés physiques, va nous être offert par l'étude que nous allons entreprendre maintenant des *caractères optiques* des minéraux, c'est-à-dire de ceux qui dépendent des diverses actions que ces minéraux exercent sur la lumière, lorsqu'elle se réfléchit à leur surface, ou lorsqu'elle est transmise au travers de leur masse.

CHAPITRE XI.

PROPRIÉTÉS DÉPENDANTES DE L'ACTION DE LA LUMIÈRE. CARACTÈRES OPTIQUES.

Les caractères optiques des minéraux sont ceux qui dépendent des diverses actions que ces corps exercent sur la lumière, soit lorsqu'elle se réfléchit à leur surface, soit lorsqu'elle est transmise au travers de leur masse. Ces caractères sont fort nombreux et de différents genres; ils ne présentent pas tous, à beaucoup près, le même degré d'importance; car il en est qui ne se montrent qu'accidentellement, et ne sauraient constituer par consé-

quent que des distinctions de simples variétés dans l'espèce ; tandis que d'autres, au contraire, sont liés intimement à la nature du minéral, ou dépendent de la structure cristalline qui lui est propre, en sorte qu'on peut les considérer comme de véritables caractères spécifiques. Les phénomènes qui résultent de la lumière transmise étant particulièrement dans ce cas, c'est par ceux de réfraction et de polarisation que nous croyons devoir commencer l'examen détaillé et suffisamment approfondi, que nous allons entreprendre, de cet ordre de faits, si remarquables en eux-mêmes, et d'une si grande valeur pour les déterminations minéralogiques.

§ 1. *Définitions et notions préliminaires. — Ce que c'est qu'un rayon de lumière naturel, et un rayon de lumière polarisé.*

Avant tout, rappelons ici quelques notions théoriques fort simples, empruntées à la physique générale, et qui nous mettront à même de mieux suivre les détails des phénomènes, de lier les faits entre eux et de les retenir plus aisément.

On sait qu'il existe en optique deux systèmes principaux sur la nature de la lumière ; que dans l'un de ces systèmes un rayon de lumière est une file de molécules qui se meuvent à la suite les unes des autres et d'un mouvement de transport, depuis le point lumineux jusqu'à l'organe de la vue ; et que dans l'autre système, c'est une file de molécules dans lesquelles on n'admet plus de mouvement de translation, et qui ne font que des oscillations ou vibrations très-petites autour de leurs positions d'équilibre. Sans nous préoccuper ici du plus ou moins de probabilité de ces systèmes, nous ferons choix du second, c'est-à-dire du *système des vibrations lumineuses*, par cette seule raison qu'il se prête mieux à l'intelligence et à l'explication complète des faits particuliers dont nous avons à traiter ici.

Un rayon de lumière sera donc pour nous une file de molécules en ligne droite, faisant partie d'un fluide éminemment élastique (l'éther), répandu partout dans la nature, et qui oscilleront l'une après l'autre, non pas dans la direction même de la propagation du mouvement, par des condensations ou des dilatations successives, comme dans les rayons sonores, mais transversalement et sans changement de densité du milieu, à la manière des parties d'une corde tendue, de longueur indéfinie, que l'on agite par l'un de ses bouts, dans un sens perpendiculaire à

sa direction. On sait que les petits mouvements ondulatoires, de directions différentes, ont la propriété de se propager ensemble sans se nuire, de se superposer les uns aux autres, sans que leur propagation en soit aucunement troublée; en sorte que la même file de molécules peut recevoir et transmettre à la fois des vibrations dans toutes sortes de sens. Si les vibrations qui ont lieu simultanément ou successivement dans les diverses molécules, s'exécutent dans tous les sens autour du rayon, en sorte qu'il y ait autant de mouvement dans un quelconque des plans qui passent par le rayon, que dans tout autre, alors le rayon offre absolument les mêmes caractères tout autour de sa direction, et quel que soit celui de ses côtés par lequel il se présente à un corps quelconque, à un miroir ou à un prisme de verre par exemple, il se comporte toujours de la même manière, dans les phénomènes de réflexion, de réfraction ou d'absorption, auxquels il donne lieu. On dit, dans ce cas, que ce rayon de lumière est *naturel*, parce qu'il ressemble à ceux qui nous arrivent directement du soleil, sans avoir éprouvé de modification au contact des corps terrestres.

Mais il peut se faire que l'état général des mouvements vibratoires dans toute l'étendue d'un rayon, soit beaucoup plus simple que celui que nous venons de supposer; que toutes les vibrations aient lieu, en même temps et successivement, dans un seul et même plan, par exemple dans le plan du méridien, si le rayon est supposé vertical : dans ce cas, il est manifeste que les propriétés du rayon ne seront plus les mêmes pour chaque point du contour, comme dans le premier cas; elles seront différentes pour les côtés nord et sud contenus dans le méridien, et pour les côtés est et ouest contenus dans le plan perpendiculaire. Ainsi, si l'on présentait à ce rayon vertical un miroir de verre sous une inclinaison de 35°, on trouverait que la réflexion serait à son maximum pour les côtés est et ouest, à son minimum et complètement nulle pour les côtés nord et sud, qui sont marqués par le sens des vibrations. A cause de cette dissemblance qu'offrent ses côtés, on dit alors que le rayon est *polarisé;* et l'on appelle *plan de polarisation* celui de tous les plans passant par le rayon auquel la direction commune des vibrations est perpendiculaire. Deux rayons sont dits être polarisés à angles droits, ou en sens contraires, quand leurs plans de polarisation sont rectangulaires. Ces deux rayons ne diffèrent l'un de l'autre que par le sens dans lequel vibrent leurs molécules, en sorte qu'il ne serait plus pos-

sible de les distinguer, si l'un d'eux faisait un quart de révolution sur lui-même (1).

Un rayon de lumière naturelle peut, par l'action d'un corps terrestre, être transformé, ou plus exactement, décomposé en deux rayons polarisés à angles droits : car l'acte de la polarisation ne consiste que dans une simple décomposition des mouvements vibratoires, par suite de laquelle ils se trouvent ramenés à deux plans fixes. Aussi, quand par un moyen quelconque on obtient un rayon polarisé dans un certain sens, il s'en produit toujours un second polarisé dans un sens perpendiculaire au premier.

§ 2. *Comment on se procure un rayon polarisé dans un sens déterminé. — Appareil aux tourmalines. — Prismes de Nicol.*

On peut se procurer un rayon de lumière polarisée de différentes manières, par réflexion sur certains corps, ou par transmission à travers d'autres, dans des circonstances déterminées. La lumière qui est réfléchie par une glace noire, sous l'angle d'environ 35°, est complètement polarisée dans le plan même de réflexion. Si l'on prend un prisme de tourmaline verte ou brune, et qu'on fasse tailler ce cristal, dans le sens de son axe cristallographique, en une lame à faces parallèles dont l'épaisseur soit au moins d'un millimètre, toute la lumière qui aura traversé cette lame dans le sens normal, sera polarisée dans le plan *perpendiculaire* à son axe. Ce dernier résultat semble être en contradiction avec ce que nous disions précédemment, de la décomposition constante de la lumière naturelle en deux faisceaux

(1) On peut souvent, par le moyen des houppes colorées de polarisation, que, suivant M. Haidinger, on parvient à voir dans un faisceau de lumière polarisé, distinguer à l'œil nu et d'une manière directe la lumière polarisée de celle qui ne l'est pas, et reconnaître le sens de sa polarisation. Il suffit de porter les yeux sur une petite image, ou une petite ouverture éclairée par la lumière dont on veut déterminer le caractère, en regardant rapidement à droite et à gauche, sans fixer l'objet. On aperçoit alors deux houppes colorées de lumière jaune, opposées l'une à l'autre et accompagnées de deux petits amas de lumière violette qui croisent cette double houppe dans sa partie la plus étroite. La direction des houppes jaunes marque exactement celle du plan de polarisation. Pour observer aisément les houppes colorées, il suffit de regarder une surface qui réfléchisse de la lumière polarisée, avec une lame de mica, en faisant tourner celle-ci par sauts un peu brusques. On peut encore regarder, à travers un spath d'Islande, les deux images qu'il donne d'un petit carré noir placé sur un fond blanc ; chacune d'elles sera polarisée en sens contraire de l'autre, et les deux houppes seront vues successivement dans des directions rectangulaires.

ment polarisés, puisqu'ici toute la lumière émergente est
: dans un plan unique. Mais il faut remarquer que cette
émergente est loin d'être égale en intensité à la lumière
e. La tourmaline étant une substance à double réfrac-
mme le calcaire dit *spath d'Islande*, décompose réelle-
rayon naturel incident en deux rayons polarisés à an-
its : mais ceux-ci éprouvent de la part du cristal, des ré-
inégales à leur transmission ; et, pour une certaine li-
paisseur que nous avons indiquée, il arrive que l'un
t déjà complètement éteint ou absorbé, tandis que
eut encore passer en grande partie.

une pareille lame de tourmaline on reçoit perpendicu-
t un rayon polarisé, et que l'on fasse tourner la lame
nême dans son propre plan, on trouvera une position
iée de cette lame pour laquelle aucune portion du rayon
ransmise : cela aura lieu quand le plan de polarisation
yon se trouvera dirigé parallèlement à l'axe de la tour-
Il suit de là, que si l'on superpose deux lames sembla-
manière que leurs axes se croisent à angles droits
pl. XVII), l'endroit où les tourmalines se recouvriront,
contre le jour, paraîtra obscur, bien que les deux tour-
soient transparentes, chacune séparément, et même
s deux ensemble, dans le cas où le croisement des axes
rigoureusement lieu. Cette opacité du couple provient
e la première tourmaline, celle qui reçoit la lumière du
arise les rayons qui la traversent perpendiculairement
s, et par conséquent parallèlement à l'axe de la seconde
ne ; ils se présentent donc à cette dernière dans la posi-
renable, pour être complètement arrêtés par elle. Ces
rmalines croisées forment un petit instrument fort sim-
giné par M. Biot, et à l'aide duquel le minéralogiste
lier les principales propriétés optiques des cristaux. Les
nt ordinairement enchâssées dans des disques, qui peu-
ner dans deux anneaux, aux extrémités d'une pince élas-
;. 64), formée ainsi que les anneaux par un même fil de
'élasticité du métal maintient les deux anneaux appli-
contre l'autre. Si l'on veut interposer une lame cristal-
e les deux tourmalines, ce qui est souvent nécessaire,
additionnelle se trouve pareillement fixée par le ressort
branches. On nomme ce petit appareil, la *pince aux*
ies.

Une seule lame de tourmaline peut servir à déterminer dans quel sens un rayon est polarisé : il suffit pour cela de chercher la position dans laquelle elle l'arrête, et l'axe de la tourmaline se trouve alors parallèle au plan de polarisation cherché.

Les lames de tourmaline, qui ne transmettent ainsi que de la lumière polarisée dans un seul sens, sont toujours plus ou moins fortement colorées. Cette circonstance est un inconvénient fâcheux, lorsqu'on veut observer à travers les tourmalines un phénomène quelconque de coloration : car leur teinte propre, en se mêlant à celle des images qu'on veut étudier, en diminue l'éclat et en change la couleur. On a imaginé de remplacer les tourmalines par des prismes de spath d'Islande, disposés de manière à ne laisser passer que les rayons, qui sont polarisés dans un sens : ces prismes de spath à simple image se nomment *prismes de Nicol*, du nom de leur inventeur. Voici comment on les obtient : on prend un rhomboèdre de spath d'Islande *abcd*, fig. 65, ayant à peu près 5 centim. de longueur et 2 centim. de largeur et d'épaisseur. On le coupe en deux parties égales par un plan *bc*, passant par les diagonales parallèles de deux de ses plus longues faces, et après avoir séparé les deux parties, on les rejoint ensemble avec du baume de Canada, dans la position qu'elles avaient d'abord. Lorsqu'on regarde longitudinalement à travers le prisme ainsi préparé, on ne voit qu'une seule image ; si l'on place deux prismes pareils l'un devant l'autre, en faisant en sorte que leurs sections principales soient parallèles, on lit facilement et distinctement au travers de ce système un livre imprimé ; mais si leurs sections principales sont à angle droit, on ne voit rien, et il y a obscurité complète. Cet appareil a donc l'avantage de réunir le pouvoir polarisant de la tourmaline à une grande transparence, et à la blancheur parfaite de la lumière (1).

(1) L'explication de ce résultat est facile. Le rayon incident R*o*, qui tombe perpendiculairement sur la face *ab*, se divise en deux rayons, l'un ordinaire et l'autre extraordinaire (*voyez* plus loin l'article concernant la double-réfraction). Ces deux rayons, en parcourant le cristal longitudinalement, rencontrent la couche de baume de Canada sous une grande obliquité. De plus, l'*indice de réfraction* de ce baume se trouve compris entre l'indice de réfraction du rayon ordinaire et celui du rayon extraordinaire. Avec l'obliquité sous laquelle les deux rayons se présentent à la couche interposée, le second peut la traverser, parce qu'elle est pour lui un milieu *plus réfringent* que celui d'où il sort, mais le premier ne le peut plus, et éprouve la réflexion totale ; il est détourné et rejeté de côté. Voilà pourquoi on n'obtient à l'émergence qu'un seul faisceau composé des rayons extraordinaires. (*Philos. Magaz*. Avril 1834 ; p. 289.)

Ces préliminaires étant établis, nous pouvons maintenant passer à l'étude des phénomènes de la réfraction. La réfraction consiste en général dans une déviation que subit un rayon de lumière, au moment où il pénètre dans un corps transparent, après être tombé obliquement sur sa surface. Si le rayon, en se brisant, reste simple, s'il ne fait que changer de route sans se partager, on dit que la réfraction est *simple*; si le rayon, en même temps qu'il est dévié, se dédouble et se bifurque, en sorte que l'on ait deux rayons réfractés pour un seul rayon incident, on dit que la réfraction est *double*. Les corps doués de la réfraction simple ne donnent qu'une seule image d'un objet délié, qu'on regarde à travers deux de leurs faces opposées; ceux qui sont doués de la double réfraction donnent généralement deux images de chaque objet, vu au travers du corps, par des faces inclinées l'une à l'autre. Occupons-nous d'abord du phénomène de la réfraction simple.

§ 3. *De la réfraction simple.*

Les corps qui possèdent la réfraction simple sont tous ceux qui sont amorphes ou non cristallisés, comme le verre, et ceux dont les cristaux se rapportent au système cubique ou régulier. Toutes les substances cristallisées, qui appartiennent aux autres systèmes prismatiques, sont douées de la double réfraction.

Soit AO (fig. 66) un rayon incident, qui se présente obliquement pour entrer dans un corps transparent, dont la surface est MN; et soit OC, le rayon réfracté. Au point d'incidence O, élevons la normale ou perpendiculaire OP, que nous prolongerons de l'autre côté dans le corps diaphane. Du point O, comme centre, et d'un rayon OA égal à l'unité de longueur, décrivons un cercle, et des points A et C, dans lesquels ce cercle coupe les rayons OA, OC, abaissons sur la normale les perpendiculaires AB, CD. L'angle i, ou AOB, formé par le rayon incident et la normale, se nomme *angle d'incidence;* l'angle r, ou COD, formé par le rayon réfracté et la normale, est l'*angle de réfraction*. La perpendiculaire AB est le sinus de l'angle d'incidence, ou sin. i; la perpendiculaire CD est le sinus de l'angle de réfraction, ou sin. r.

Cela posé, l'observation fait voir que la réfraction simple est soumise à la loi suivante, qu'on appelle *Loi de Descartes*. Toujours le rayon réfracté et le rayon incident sont dans un même

plan, perpendiculaire à la surface réfringente; et pour la même substance, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant; c'est-à-dire que si l'obliquité du rayon incident vient à varier, les deux sinus AB, CD varieront tous deux en même temps, mais de manière que leur rapport ne changera pas, en sorte qu'il suffira de le calculer pour une incidence quelconque. Ce rapport constant est ce qu'on nomme l'*indice de réfraction*. Représentons par n sa valeur pour une substance déterminée : on a généralement la formule $n = \frac{\sin. i}{\sin. r}$. Lorsque la lumière passe de l'air dans le verre, on a $n = \frac{3}{2}$; pour l'eau, on aurait $n = \frac{4}{3}$; pour le diamant, $n = \frac{7}{4}$, ou 1,75.

L'indice de réfraction étant constant pour une même substance, et variant généralement d'une substance à une autre, il peut servir à établir des distinctions entre les substances minérales, lorsqu'elles sont transparentes et chimiquement pures. On a donc dressé des tables des indices de réfraction des différents corps, que l'on peut consulter, comme on consulte celle des densités ou pesanteurs spécifiques. Mais ce moyen de détermination n'est légitime qu'autant que la substance examinée est exactement dans le même état de composition moléculaire que celle qui a fourni le nombre donné par les tables. Si elle était mélangée de principes accidentels, cette circonstance ferait varier l'indice de réfraction, dont la valeur serait en quelque sorte la résultante des effets produits par les molécules propres de la substance, et par les molécules étrangères. L'existence fréquente des mélanges accidentels dans les minéraux, restreint beaucoup l'application et l'importance de ce moyen de distinction, emprunté à la physique générale. Quoi qu'il en soit, nous rapporterons dans la table suivante, les indices de réfraction d'un grand nombre de substances minérales, tels que les physiciens et les minéralogistes nous les ont fait connaître. Les valeurs de ces indices sont toutes comprises entre 1 et 3; dans cette table sont réunies non-seulement les substances à réfraction simple, dans lesquelles l'indice de réfraction a une valeur constante; mais encore les substances bi-réfringentes. Pour celles-ci, la réfraction est généralement variable, et par conséquent aussi la valeur de n, qui se rapporte à l'un ou à l'autre des deux rayons

actés; aussi a-t-on dû indiquer celles qui se rapportent à la action *minima*, et à la réfraction *maxima*, ou bien une va- qui représente en quelque sorte la réfraction moyenne, lors- les limites de variation sont très-resserrées, ce qui est le cas us ordinaire.

TABLEAU DES INDICES DE RÉFRACTION DES PRINCIPALES SUBSTANCES MINÉRALES.

ans les substances uniréfringentes, l'indice constant de ré- tion est désigné par n. Dans les substances biréfringentes, s *à un axe* (voir plus loin), ε désigne l'indice ordinaire, et ω lice extraordinaire fourni par un prisme dont l'arête est pa- :le à l'axe. Dans les substances biréfringentes, dites *à deux* :, α, β, γ désignent les trois indices *maximum*, *moyen* et *mi- um* fournis par trois rayons de lumière, dirigés et en même ps polarisés perpendiculairement à trois droites rectangu- s, qui sont les deux bissectrices des angles formés par les x axes, et la normale au plan qui les contient. Il représente ;énéral la valeur moyenne des indices.

A. *Substances uniréfringentes.*

Noms des substances.	Indices de réfraction.
Diamant	$n=2{,}470$
Blende	$n=2{,}369$
Rubis spinelle	$n=1{,}812$
Grenat	$n=1{,}81$
Pyrope	$n=1{,}792$
Azotate de plomb	$n=1{,}758$
Boracite	$n=1{,}701$
Sel ammoniac	$n=1{,}625$
Sel gemme	$n=1{,}557$
Agathe calcédoine	$n=1{,}553$
Amphigène	$n=1{,}527$
Obsidienne	$n=1{,}488$
Opale	$n=1{,}479$
Alun	$n=1{,}457$
Quarz fondu	$n=1{,}45$
Fluorine (spath fluor)	$n=1{,}434$
Eau	$n=1{,}336$

B. *Substances biréfringentes à un axe.*

Noms des substances.	Indices de réfraction.	
Cinabre (sulfure de mercure)	$\omega = 3,201$ $\varepsilon = 2,854$	Descloizeaux.
Greenockite (sulfure de cadmium)	$\mu = 2,688$	Miller.
Calomel (protochlorure de mercure)	$\omega = 2,60$ $\varepsilon = 1,96$	Sénarmont.
Argent rouge	$\mu = 2,564$	Brewster.
Anatase	$\omega = 2,554$ $\varepsilon = 2,493$	Miller.
Schéelite	$\varepsilon = 2,129$ $\omega = 1,790$	Brewster.
Fer oligiste écailleux	$\mu = 2,10$	
Zircon hyacinthe	$\omega = 1,97$ $\varepsilon = 1,92$	Sénarmont.
Corindon incolore	$\mu = 1,768$	Wollaston.
Dioptase	$\omega = 1,723$ $\varepsilon = 1,667$	Miller.
Idocrase	$\omega = 1,721$ $\varepsilon = 1,719$	Descloizeaux.
Phénakite	$\omega = 1,672$ $\varepsilon = 1,652$	Sénarmont.
Parisite	$\omega = 1,670$ $\varepsilon = 1,569$	Sénarmont.
Tourmaline	$\mu = 1,668$	Brewster.
Calcaire spathique	$\varepsilon = 1,658$ $\omega = 1,486$	Rudberg.
Apatite	$\varepsilon = 1,646$ $\omega = 1,641$	Heusser.
Méionite	$\mu = 1,606$	
Azotate de soude	$\varepsilon = 1,586$ $\omega = 1,336$	Descloizeaux.
Émeraude	$\mu = 1,585$	Brewster.
Pennine	$\mu = 1,575$	Haidinger.
Quarz hyalin	$\omega = 1,553$ $\varepsilon = 1,544$	Rudberg.
Apophyllite	$\mu = 1,543$	Herschell.
Néphéline	$\varepsilon = 1,542$ $\omega = 1,537$	Descloizeaux.

Noms des substances.	Indices de réfraction.	
Mellite	$\varepsilon = 1,550$ $\omega = 1,525$	Descloizeaux.
Sulfate potassique à un axe	$\omega = 1,501$ $\varepsilon = 1,493$	Sénarmont.
Glace	$\mu = 1,3095$	Bravais.

C. *Substances biréfringentes à deux axes.*

Plomb rouge (chromaté)	$\alpha = 2,974$ $\gamma = 2,500$	Brewster.
Soufre natif	$\mu = 2,115$	
Céruse (carbonate de plomb)	$\alpha = 2,074$ $\beta = 2,072$ $\gamma = 1,798$	Descloizeaux.
Anglésite (sulfate de plomb)	$\mu = 1,925$	
Cymophane	$\alpha = 1,756$ $\beta = 1,748$ $\gamma = 1,747$	Descloizeaux.
Staurotide	$\mu = 1,753$	
Axinite	$\mu = 1,735$	
Épidote vert	$\alpha = 1,703$ $\gamma = 1,661$	
Sphène	$\beta = 1,631$	Miller.
Strontianite (carbonate de strontiane)	$\alpha = 1,700$ $\gamma = 1,543$	Brewster.
Péridot	$\alpha = 1,697$ $\beta = 1,678$ $\gamma = 1,661$	Descloizeaux.
Arragonite	$\alpha = 1,686$ $\beta = 1,682$ $\gamma = 1,530$	Rudberg.
Pyroxène diopside	$\beta = 1,680$	Miller.
Euclase	$\alpha = 1,671$ $\beta = 1,655$ $\gamma = 1,652$	Descloizeaux.
Barytine (sulfate de baryte)	$\alpha = 1,647$ $\beta = 1,637$ $\gamma = 1,636$	Heusser.
Célestine (sulfate de strontiane)	$\mu = 1,644$	Brewster.
Andalousite	$\mu = 1,637$	

Noms des substances.	Indices de réfraction	
Topaze incolore.	$\alpha = 1,624$	Rudberg.
	$\beta = 1,616$	
	$\gamma = 1,614$	
Karsténite ou anhydrite.	$\alpha = 1,614$	Miller.
	$\beta = 1,576$	
	$\gamma = 1,571$	
Comptonite.	$\mu = 1,553$	
Sulfate de cuivre.	$\alpha = 1,552$	Brewster.
	$\gamma = 1,531$	
Cordiérite.	$\alpha = 1,543$	Descloizeaux.
	$\beta = 1,541$	
	$\gamma = 1,537$	
Withérite (carbonate de baryte).	$\gamma = 1,540$	Brewster.
Gypse (sulfate de chaux hydr.).	$\alpha = 1,529$	Angstrœm.
	$\beta = 1,522$	
	$\gamma = 1,520$	
Feldspath orthose.	$\alpha = 1,526$	Descloizeaux.
	$\beta = 1,524$	
	$\gamma = 1,519$	
Mésotype.	$\alpha = 1,522$	Brewster.
	$\gamma = 1,516$	
Stilbite.	$\mu = 1,508$	
Nitre.	$\alpha = 1,505$	Miller.
	$\beta = 1,504$	
	$\gamma = 1,333$	
Sulfate de fer.	$\alpha = 1,494$	Brewster.
Sulfate de potasse.	$\mu = 1,494$	Sénarmont.
Sulfate de zinc.	$\beta = 1,483$	Sénarmont.
Sulfate de magnésie.	$\beta = 1,482$	Miller.
Borax (borate de soude).	$\mu = 1,475$	Brewster.
Sel de Glauber (sulfate de soude).	$\beta = 1,44$	Miller.
Cryolithe.	$\mu = 1,349$	

§ 4. *Détermination de l'indice de réfraction par la mesure de la déviation minima.*

Parmi les différents moyens que l'on peut employer, pour déterminer l'indice de réfraction d'une substance donnée, le suivant qui est dû à Newton est un des plus simples. On fait tailler

la substance en prisme BAC, fig. 67, ou bien, si elle est cristallisée, on choisit un cristal qui offre deux faces AB, AC, faisant entre elles un angle dièdre A. Ce prisme étant mis dans une position fixe, et l'œil de l'observateur étant supposé en I, on vise un objet ou point de mire O situé à une grande distance, d'abord par réfraction dans le prisme, au moyen du rayon brisé IMNO, puis directement par le rayon IO', sensiblement parallèle à NO. L'angle MIO' formé par le rayon direct IO', et le rayon émergent IM, est ce qu'on nomme l'angle de la déviation produite par le prisme.

Cela posé, pendant qu'on vise l'objet à travers le prisme, si l'on fait tourner celui-ci sur son axe, on verra que l'image de l'objet se déplacera, et que par conséquent la déviation sera changée. Mais en même temps on remarquera qu'en partant d'une position extrême pour faire tourner le prisme toujours dans le même sens, l'image se rapprochera d'abord de la position réelle, puis s'arrêtera pour s'en éloigner ensuite. Dans la position où elle devient stationnaire, la déviation de l'image a atteint son *minimum*.

Supposons donc le prisme amené et fixé dans la position qui donne ce minimum de déviation, et représentons par D cette déviation particulière, c'est-à-dire l'angle formé par le rayon dirigé sur l'image et le rayon dirigé sur l'objet. Le rayon réfracté dans l'intérieur du prisme se trouve faire alors un angle égal avec chacune des faces réfringentes; et l'angle de réfraction est juste la moitié de l'angle A compris entre les faces réfringentes. De plus, l'angle d'incidence est évidemment égal à l'angle de réfraction, plus la moitié de l'angle de la déviation. On a donc

$$r = \frac{A}{2}; \; i = \frac{A}{2} + \frac{D}{2};$$

et par conséquent

$$\sin. r = \sin. \frac{1}{2} A,$$

$$\sin. i = \sin. \frac{1}{2} (A + D),$$

et

$$n = \frac{\sin. \frac{1}{2} (A + D)}{\sin. \frac{1}{2} A}.$$

On n'a donc qu'à observer l'angle D de la déviation *minima*, et à

mesurer l'angle dièdre A, du prisme formé par les deux faces réfringentes. Or, ces deux observations peuvent se faire avec un goniomètre à réflexion quelconque.

Supposons d'abord qu'on veuille opérer avec le goniomètre de Wollaston. On fixera avec de la cire le prisme transparent, dont la coupe est BAC, fig. 68, sur le support du goniomètre, de manière que son axe soit parallèle à celui de l'instrument, passant par le point E. L'œil étant placé en I, on cherchera à apercevoir un objet O par réfraction à travers le prisme, au moyen du rayon brisé ONMI. L'objet O peut être une fente horizontale pratiquée dans une fenêtre fermée. L'image de cette ligne sera vue dans la direction du rayon émergent IM. On fera tourner le prisme sur son axe, jusqu'à ce que cette image devienne stationnaire. Admettons que dans ce cas elle soit vue dans la direction IP, elle paraîtra naturellement irisée ; on choisira dans cette image, que nous supposerons projetée sur le mur de la fenêtre en P, la partie la plus éclairée, qui répondra à peu près au jaune, et on y fixera un repère, tel qu'une petite bande de papier, avec une ligne noire horizontale. Si le prisme est très-éloigné de l'objet, l'angle de la déviation *minima* sera égal à OEP; il ne s'agira donc, pour le connaître, que de mesurer la distance angulaire de O à P. Pour cela, supposons une seconde mire placée en R, au-dessus de O; et en visant par réflexion sur l'une des faces du prisme, par exemple sur AB, amenons par un mouvement de rotation imprimé au cristal, l'image de R à coïncider successivement avec O et avec P. Si l'on a soin de noter le nombre de degrés, marqué par le cercle, lorsque l'une des coïncidences a lieu, le mouvement angulaire qu'il faudra exécuter pour passer à la seconde, sera égal à la moitié de l'angle cherché, c'est-à-dire à $\frac{D}{2}$. On aura donc de cette manière une mesure suffisamment approchée de la déviation *minima* D. Quant à l'angle A du prisme, il est clair qu'il sera donné comme à l'ordinaire par une coïncidence d'images, obtenue successivement sur les deux faces du prisme.

Si l'on a à sa disposition un instrument pourvu de lunettes, tel qu'un cercle répétiteur, ou un goniomètre de Babinet, on pourra s'en servir avec avantage pour la mesure de la déviation *minima*. Dans le cas du cercle répétiteur, on dirige une des lunettes sur un point de mire très-éloigné, et l'autre sur l'image de cette mire, vue par réfraction dans le prisme ; puis on varie

à la fois les positions du prisme et de la seconde lunette, jusqu'à ce qu'on ait rencontré celles qui répondent à la moindre déviation; l'angle formé par les axes des lunettes est précisément égal à celui que l'on cherche. Si l'on veut opérer avec le goniomètre de Babinet (V. p. 59, la description de ce goniomètre), il faut disposer le prisme et les lunettes de manière à obtenir par réfraction, et dans la lunette mobile, la vue d'un spectre coloré, dû au fil vertical de la lunette fixe; puis on cherche par tâtonnement le spectre qui répond à la déviation *minima*. Cela fait, on choisit dans ce spectre une ligne déterminée, telle que celle qui occupe le milieu de la partie jaune; on amène le point de croisement des fils de la lunette mobile à coïncider avec cette ligne, et l'on relève la position de cette lunette relativement à la direction de la lunette fixe. On a de cette manière la déviation *minima*; mais, pour plus d'exactitude, après avoir noté le point du cercle qui correspond à cette position de la lunette, on fait une seconde observation tout-à-fait semblable, en transportant la lunette mobile de l'autre côté de la ligne qui passe par la lunette fixe, et en cherchant à lui restituer de ce côté le spectre le moins dévié; on prend la moitié de la distance angulaire, comprise entre les deux stations, et l'on a ainsi une mesure plus exacte de la déviation cherchée.

L'indice de réfraction d'une substance peut aussi, dans certains cas, se conclure par le calcul d'une autre observation, celle de l'angle de la polarisation *maxima*, c'est-à-dire de l'angle que doit faire un rayon lumineux incident avec la surface d'un minéral, pour que le rayon réfléchi correspondant soit polarisé le plus complètement possible. D'après Brewster, cet angle est celui pour lequel le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté (1).

Lorsque la lumière se présente pour passer de l'air dans un milieu beaucoup plus dense, tel qu'un corps solide, elle pénètre toujours en partie dans le milieu, et éprouve le phénomène de la réfraction; il n'en est pas de même, lorsqu'elle se présente à la seconde surface du corps solide pour repasser dans l'air ou dans le vide; elle ne peut pas toujours sortir du milieu le plus dense, en subissant une nouvelle réfraction; cette réfraction peut devenir impossible, et, alors, il y a *réflexion totale* à la seconde surface du milieu. Pour ce cas de réfraction,

(1) Il en résulte que l'indice de réfraction n est égal à la tangente de l'angle de la polarisation *maxima*.

l'indice aurait une valeur inverse de celle qui avait lieu lors du passage de l'air dans le corps solide, c'est-à-dire que si l'on avait alors $\frac{\sin. i}{\sin. r} = n$, on doit avoir, pour la seconde réfraction, $\frac{\sin. i'}{\sin. r'} = \frac{1}{n}$. Or, $\frac{1}{n}$ étant plus petit que l'unité, il y aura toujours un certain angle d'incidence i' pour lequel sin. i' sera égal à $\frac{1}{n}$; à ce moment là, sin. r' sera égal à 1, et r' à 90°; le rayon réfracté rasera la seconde surface du corps. Pour toutes les incidences plus grandes que cette valeur limite, la réfraction à la surface de sortie n'est plus possible, et alors a lieu le phénomène remarquable de la réflexion totale. Cette réflexion à la seconde surface est si intense, même dans les substances les plus transparentes, comme le verre, qu'elle fait paraître souvent cette surface avec un éclat qui rappelle celui des substances métalliques. Plusieurs effets de lumière, que nous offriront les lames ou les cristaux épais des minéraux transparents, trouveront leur explication naturelle dans le fait que nous signalons ici.

§ 5. *De la polarisation, et de la réfraction double.*

Passons maintenant à l'examen des phénomènes de polarisation et de double réfraction que manifeste la lumière transmise à travers les substances cristallisées : ce sont là les propriétés optiques les plus importantes et les plus caractéristiques, parce qu'elles se montrent toujours en rapport avec les modifications de la structure, et avec les grandes différences de symétrie des systèmes cristallins. On les observe dans tous les minéraux cristallisés, excepté ceux qui appartiennent au système régulier. Ces phénomènes consistent en une décomposition du faisceau de lumière incidente en deux rayons, polarisés à angles droits, et qui, à raison de cette différence de polarisation, se meuvent généralement dans le cristal avec des vitesses de propagation différentes, et, le plus souvent, dans des directions pareillement différentes.

La bifurcation ou séparation angulaire des deux rayons composants, est ce qu'il y a de plus sensible, et ce que l'on a remarqué tout d'abord dans le phénomène de la double réfraction; cependant, ce n'est pas le seul fait qui résulte de l'action du cris-

al sur la lumière, ni même le fait principal. Le fait primitif et ju'on doit signaler avant tout autre, c'est la double polarisation jue subit le faisceau incident, ou sa décomposition en deux utres, polarisés en sens contraires; la double réfraction n'est jue la conséquence de ce premier fait : car, c'est parce que les leux faisceaux composants ont des sens différents de polarisation, ju'ils éprouvent de la part du cristal des résistances inégales lans leur marche, et par suite qu'ils se meuvent avec des vi- esses différentes, et le plus souvent dans des directions diffé- entes. Nous disons *le plus souvent :* car, dans certains cas, il y décomposition du faisceau en deux rayons, sans qu'il y ait lans l'intérieur du cristal séparation de ces rayons, autrement jue par l'avance que l'un d'eux prend sur l'autre, en se propa- geant dans le même sens. Mais bien qu'ils paraissent confon- lus dans le cristal, leur distinction devient sensible à l'émer- gence ; car ils se séparent alors, s'ils viennent à sortir par une ace oblique, leur différence de vitesse entraînant toujours dans e cas une différence de réfraction.

§ 6. *Comment on constate l'existence de la double réfraction dans un corps cristallisé.*

Le phénomène de la bifurcation de la lumière, ou celui des loubles images, qui en est la conséquence, étant un des signes es plus certains de la double réfraction, il convient d'étudier es moyens d'en constater l'existence. L'observation de la dou- ble image d'un objet délié se fait avec la plus grande facilité lans le calcaire spathique limpide (dit *spath d'Islande*), et dans e soufre cristallisé, parce que, le phénomène ayant lieu dans es corps lorsqu'on regarde de très-près un objet à travers des aces parallèles, à cause de leur pouvoir biréfringent très-éner- gique, il suffit de tracer un point ou une ligne noire sur un pa- pier, et d'appliquer le cristal dessus, pour apercevoir aussitôt leux images du point ou de la ligne. Pour les autres substances, par exemple pour les cristaux de quarz ou de topaze, la bifurca- ion du faisceau aurait encore lieu dans la même circonstance, nais si faiblement, qu'il faudrait des plaques très-épaisses pour u'elle devînt sensible. Un cristal de quarz à faces parallèles, e quatre à cinq centimètres d'épaisseur, ne paraîtrait pas dou- ler à la vue simple, parce que les deux images ne seraient pas uffisamment séparées pour être distinctes : mais on pourrait

prouver leur existence, en les regardant avec une lentille, d'une distance focale égale à la distance des deux faces extrêmes, et dont le grossissement aurait pour effet de dégager les deux images en agrandissant leur distance angulaire. Si l'on ne veut pas avoir recours à ce moyen, il faut alors observer la double réfraction de ces substances à travers deux faces réfringentes obliques, dont la rencontre mutuelle formerait un coin transparent, ou ce que l'on appelle un prisme, dans le langage ordinaire de l'optique : cette condition de l'obliquité des deux faces rend possible l'observation du phénomène, même dans de très-petits cristaux, parce qu'alors les deux rayons ne sortant plus du cristal dans des directions parallèles, comme dans le premier cas, mais en divergeant, finissent toujours par se séparer nettement à une distance plus ou moins grande.

Voici comment on s'y prend pour faire commodément l'expérience pendant le jour : on applique l'une des faces du corps contre l'œil, et l'on tient en même temps de l'autre main une épingle dirigée horizontalement, que l'on présente à une certaine distance du cristal, et que l'on regarde à travers les faces réfringentes. En faisant mouvoir cette épingle de bas en haut, on parvient bientôt à une position dans laquelle on voit deux images de l'épingle, situées l'une au-dessus de l'autre et irisées.

On peut aussi faire l'expérience le soir, en regardant à travers le corps une bougie allumée, placée à une certaine distance. On voit alors deux images de la flamme, ordinairement nettes et bien séparées. C'est par ces moyens d'observation que l'on peut souvent distinguer l'une de l'autre deux pierres taillées à facettes par le lapidaire, et qui tendent à se confondre par leurs caractères extérieurs : ainsi, on distinguera toujours le diamant de la topaze incolore, en ce que le premier n'a que la réfraction simple, tandis que la topaze est douée de la double réfraction.

Les moyens indiqués précédemment ne peuvent s'appliquer qu'aux cristaux d'un volume sensible, qui offrent naturellement des faces planes inclinées, ou sur lesquels on peut en produire artificiellement par la taille. La pince aux tourmalines peut servir à reconnaître si un minéral possède la réfraction simple ou double, sans qu'on soit obligé de le tailler préalablement, ni d'opérer sur des plaques épaisses. Une lame, quelque mince qu'elle soit, comme celles de mica et de gypse, peut être soumise à ce nouveau procédé. On se rappelle que lorsque les deux pla-

ques de tourmaline sont croisées à angles droits, elles ne laissent passer entre elles aucune portion de lumière; et qu'on aperçoit, en regardant à travers, une tache noire à l'endroit où elles se croisent. Mais si l'on interpose entre les deux plaques une lame d'un minéral quelconque doué de la double réfraction, il arrivera généralement que le faisceau transmis par la première plaque se décomposera dans cette lame en deux faisceaux polarisés à angles droits, et par conséquent il y aura toujours, dans l'un ou dans l'autre faisceau, des rayons disposés de manière à pouvoir être transmis par la seconde plaque. On verra donc la transparence remplacer tout-à-coup l'obscurité, qui existait aux points de croisement.

Nous avons dit qu'il arriverait *généralement* au rayon transmis par la première plaque, de se décomposer dans la lame intermédiaire, si celle-ci est de nature biréfringente. Il pourrait se faire cependant que pour certaines positions limites de cette lame, cet effet n'eût pas lieu. Mais on parviendra facilement à éviter ces cas exceptionnels, si l'on a soin de faire tourner la lame sur elle-même dans son propre plan, comme aussi de l'incliner légèrement entre les deux tourmalines, en tenant celles-ci à une certaine distance l'une de l'autre. On verra plus loin la nécessité de ces précautions, lorsque nous aurons parlé les propriétés particulières aux lignes et plans, qu'on nomme *axes optiques* et *sections principales*, dans les substances bi-réfringentes.

De ce qu'une substance transparente laisse passer de la lumière entre les tourmalines croisées, il ne s'ensuit pas d'une manière tout-à-fait rigoureuse, que cette substance possède la structure cristalline simple, d'où dépend le phénomène que nous étudions ici, ni que cette substance ne soit pas une de celles du système cubique, si elle est cristallisée. Certains corps de ce dernier système, tels que la boracite, la blende, l'analcime; certaines variétés de diamant, et des substances non cristallines, comme l'opale hyalite, le verre trempé, et un mélange d'huile et de verre pilé, ont la vertu de dépolariser le rayon transmis par la première tourmaline, et par conséquent de la rendre capable de passer par la seconde. On attribue ces effets particuliers à des états d'aggrégation non uniformes, ou à des structures composées, lamellaires ou polyédriques, dont les éléments se succèdent par intermittences, circonstances par lesquelles ces corps diffèrent des cristaux simples, qui n'offrent point de

discontinuité dans leur structure moléculaire. Mais ces cas se rencontrent assez rarement, surtout parmi les substances naturelles cristallisées; et, par conséquent, la conclusion que l'on tire de l'expérience faite avec les tourmalines, est au moins très-probable, si elle n'est pas certaine. Nous ferons d'ailleurs bientôt connaître d'autres moyens d'observation, qui sont propres à lui servir de vérification.

Avant d'aller plus loin, remarquons combien de distinctions importantes peuvent déjà être établies entre les substances inorganiques, par le seul fait de l'absence ou de la présence dans ces corps de la propriété biréfringente. On saura toujours distinguer, par cette opposition de caractères, le cristal de roche taillé du verre artificiel, le diamant de la topaze limpide ou du saphir blanc, le rubis spinelle du rubis oriental, le zircon du grenat essonite (ou kaneelstein). Ces deux dernières substances ont souvent beaucoup de ressemblance extérieure, et elles ont été confondues dans le commerce de la bijouterie sous le nom commun de hyacinthe. La première possède la double réfraction, et la seconde est dépourvue de cette propriété. Celle-ci a été regardée par quelques minéralogistes comme une simple variété de grenat; et cette opinion est appuyée par l'expérience, qui montre que l'essonite, comme le grenat, a la réfraction simple.

§ 7. *Distinction de deux espèces d'axes, savoir : des axes d'élasticité, et des axes optiques proprement dits, ou axes de double réfraction. — Cristaux à un axe, et cristaux à deux axes optiques.*

Mais ce n'est pas seulement par son absence ou par sa présence que le phénomène de la double réfraction peut établir des distinctions entre les minéraux cristallisés; c'est encore par les modifications particulières que ce phénomène éprouve dans la série des substances biréfringentes, modifications qui sont toujours en rapport avec celles des systèmes cristallins, et d'autant plus compliquées que la symétrie du système s'éloigne davantage de celle du système cubique. Parlons d'abord des circonstances qui sont communes à tous les cristaux biréfringents; il nous sera facile ensuite de signaler les circonstances variables.

Le phénomène de la double réfraction ne se montre pas de la même manière, ni avec la même intensité, dans toutes les directions au dedans du cristal. En général, quand on étudie

dans les cristaux une propriété quelconque, qui varie en intensité avec la direction dans laquelle on l'observe, on donne le nom d'*axes* aux directions particulières, dans lesquelles cette propriété atteint son *maximum* ou son *minimum*. Dans les cristaux à réfraction simple, il n'y a jamais qu'un seul rayon réfracté, qui se propage toujours avec la même vitesse, et pour lequel l'indice de réfraction a toujours la même valeur : il n'y a là aucune quantité variable qui tende à se rapprocher d'une limite. Ces cristaux ne peuvent donc donner lieu, sous le rapport des propriétés optiques, à aucune distinction d'axes. Il n'en est pas de même des cristaux biréfringents, où l'on a en général à considérer deux rayons réfractés, qui diffèrent généralement entre eux, soit par leur direction, soit par leur vitesse de propagation dans l'intérieur du cristal. Aussi peut-on y reconnaître deux sortes d'axes ou de lignes particulières, qui jouissent de certaines propriétés caractéristiques, et dont les unes se nomment *axes d'élasticité*, et les autres *axes optiques* : les premiers se rapportent aux variations de direction, et les seconds aux variations de vitesse.

1° *Axes d'élasticité* (1). Supposons qu'un faisceau de lumière

(1) Il s'agit ici de l'élasticité optique du milieu éthéré qu'on suppose interposé dans le cristal, et non de l'élasticité mécanique ou acoustique du cristal lui-même. Fresnel a montré que les propriétés optiques des milieux bi-réfringents sont la conséquence de l'élasticité de l'éther, qui est très-inégale, suivant les différentes directions qu'on peut concevoir dans le corps cristallisé. Ses variations paraissent réglées généralement sur celles du milieu pondérable, et dans les corps cristallisés, elle ne peut pas être la même dans les directions pour lesquelles l'intervalle moléculaire est différent. Il existe toujours dans un cristal trois directions, rectangulaires entre elles, qui jouissent de la propriété suivante : que tout déplacement d'une molécule d'éther suivant l'une d'elles développe une élasticité dont la direction coïncide avec celle du déplacement. Ces directions s'appellent les *axes d'élasticité*, et les trois élasticités correspondantes sont les *élasticités principales* du milieu, parmi lesquelles se rencontrent toujours la plus grande élasticité et la plus petite : la troisième élasticité principale se nomme l'*élasticité moyenne*. Si l'on désigne par A, B, C, les trois axes d'élasticité et par a, b, c les vitesses de propagation des vibrations parallèles à ces axes, la théorie fait voir que les élasticités principales sont proportionnelles à a^2, b^2 et c^2. Dans certains cristaux (les cristaux à un axe optique), un seul des axes d'élasticité est fixe, les deux autres pouvant être pris à volonté dans le plan perpendiculaire au premier ; ce qui revient à dire que, dans ce cas, il y a une infinité d'axes d'élasticité qui sont contenus dans un seul plan. Dans tous les autres cristaux (les cristaux à deux axes optiques), les trois directions sont déterminées à la fois, et par conséquent il n'existe dans ces cristaux que trois axes d'élasticité en tout.

Fresnel a fait voir en outre, que, si l'on prend sur les trois axes d'élasticité et en même temps sur toutes les autres directions possibles, à partir de leur point commun de croisement, des longueurs proportionnelles aux racines car-

naturelle tombe normalement sur une face, qui ait été établie perpendiculaire à une certaine direction dans un cristal biréfringent, il arrivera que ce faisceau se décomposera en deux autres, polarisés en sens contraire, qui se propageront dans le cristal avec des vitesses différentes, et *en général* dans des directions différentes. Mais, comme nous l'avons déjà fait observer page 369, pour certaines directions particulières il y aura décomposition de chaque rayon en deux autres, sans qu'il y ait bifurcation ou séparation angulaire, en sorte que la différence de direction que l'on remarque généralement dans les deux rayons composants, et qui varie en quantité, deviendra nulle pour chacune des lignes dont il s'agit : les deux rayons sembleront donc se confondre et n'en faire qu'un dans le cristal; et si la face de sortie est aussi perpendiculaire à cette ligne, les deux rayons ne se sépareront pas davantage en passant dans l'air, et par conséquent on aura des images simples, en regardant à travers deux faces parallèles entre elles, et perpendiculaires toutes deux à cette direction. Mais si l'émergence a lieu par une face oblique, il y aura séparation des deux rayons dans l'air, et production d'images doubles. Les directions particulières qui remplissent cette condition, sont les *axes d'élasticité*. Dans une certaine classe de cristaux biréfringents, il y en a trois seulement; et dans une autre classe, il en existe une infinité. Les axes d'élasticité sont donc des lignes pour lesquelles la bifurcation ou séparation angulaire des deux rayons réfractés est nulle, sous la condition d'incidence énoncée plus haut; et le caractère distinctif d'un axe d'élasticité consiste en ce qu'il donne lieu à des images simples à travers deux faces qui lui sont perpendiculaires, et à des images doubles à travers des faces obliques, dont une seule (savoir celle tournée vers l'objet) est perpendiculaire à cet axe.

2° *Axes optiques*. Nous venons de voir que certaines directions (les axes d'élasticité) avaient la propriété d'être parcourues par deux rayons réfractés, de polarisation contraire, avec des vitesses

rées des élasticités dans ces directions, on formera une surface, appelée *surface d'élasticité*, représentée par l'équation

$$a^2x^2 + b^2y^2 + c^2z^2 = r^4,$$

dans laquelle on a fait, pour abréger, $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$. Cette surface peut toujours être coupée par deux plans diamétraux suivant deux cercles; et ce sont les normales à ces sections circulaires qui sont les axes optiques ordinaires, ou axes optiques proprement dits.

différentes. Pour toute autre direction dans le cristal, il existe pareillement deux rayons de polarisation contraire, qui peuvent la parcourir avec des vitesses différentes : seulement, ces rayons ne sont plus les rayons *conjugués*, provenant de la division d'un seul et même rayon incident; ils se rapportent à deux rayons différents *m i*, *m' i*, très-voisins, et qui tombent au même point *i* de la surface du cristal (fig. 69). On sent bien que si le rayon *m i* donne deux rayons réfractés *i o*, *i e*, dont le second soit plus rapproché de la normale, il devra exister un autre rayon *m' i*, de position telle que celui de ses deux rayons réfractés qui est analogue à *i o*, se confondra avec *i e*, le second prenant une direction comme *i e'*, plus rapprochée de la normale. La différence des vitesses de ces deux rayons *concomitants* (ou de même direction) varie en général, et va en diminuant à mesure qu'on se rapproche d'*une* ou de *deux* directions particulières, pour lesquelles elle atteint son *minimum*, en devenant nulle. Ajoutons encore que pour ces directions limites et exceptionnelles, ce ne sont plus deux rayons polarisés seulement, de sens de polarisation contraires, qui peuvent s'y propager ; contrairement à toutes les autres, elles peuvent admettre des rayons polarisés dans tous les sens, et les propager tous également avec la même vitesse. Ces directions particulières sont ce qu'on nomme des *axes optiques*.

Ainsi, pour les axes d'élasticité, il y a toujours une différence de vitesse, et même très-grande, comparativement à ce qui a lieu sur les autres lignes, entre les rayons diversement polarisés, qui se meuvent dans leur direction : pour les axes optiques, au contraire, la différence des vitesses est nulle : la vitesse de propagation est absolument la même pour tous les rayons qui les parcourent, quel que soit leur sens de polarisation.

On a appelé aussi les axes optiques, des *axes de double réfraction*, en les considérant comme des directions dans lesquelles la double réfraction devenait nulle, où les rayons n'étaient point sollicités à se partager en deux, et ne pouvaient plus produire que des images simples, au lieu des doubles images qu'on observe dans les cas de dédoublement. La double réfraction est en effet nulle dans ces directions; mais cela n'est vrai d'une manière générale que quand il s'agit de la transmission à travers le cristal d'ondes lumineuses planes, c'est-à-dire de larges faisceaux de rayons parallèles, partis de points très-éloignés (1). Si

(1) Fresnel a démontré qu'il n'en serait plus de même, s'il s'agissait de rayons isolés, émanés d'un point très-rapproché, par exemple d'un point de la surface

l'on cherche à remplir cette condition, quand on regarde à travers le cristal, en visant toujours à un objet lointain, on ne verra jamais qu'une seule image de cet objet, si les rayons tombent normalement sur une face perpendiculaire à un axe optique, lors même que la seconde face, celle contre laquelle on applique l'œil, serait oblique sur la première.

De ce que les images paraîtraient simples à l'œil nu, on ne pourrait pas toujours conclure à l'existence d'un axe optique, ou à l'absence complète de la double réfraction : car, celle-ci pourrait être assez faible, pour que les deux images se confondissent, surtout si le cristal avait peu d'épaisseur. Il existe heureusement d'autres caractères qui peuvent remplacer celui de la double image : tel est le beau phénomène des *anneaux colorés, coupés par des lignes noires*, qui se manifeste autour des axes optiques, quand on place dans l'appareil aux tourmalines une plaque de la substance biréfringente, taillée à faces parallèles dans un sens perpendiculaire à une de ces lignes, et qu'on regarde à travers l'appareil, en appliquant l'œil tout contre. Nous reviendrons bientôt sur ce phénomène curieux et important, dans lequel la couleur en chaque point est produite par les rayons polarisés, de vitesses différentes, qui ont traversé obliquement le cristal, en suivant une même direction, voisine de celle de l'axe opti-

même du cristal. Dans ce cas, la double réfraction ne serait nulle, pour ceux de ces rayons qui traverseraient le cristal dans la direction d'un axe optique, qu'autant que ce corps n'aurait qu'un seul axe; elle ne le serait jamais réellement, dans un cristal à deux axes, pour aucune direction : là, en effet, pour tout rayon normal à une direction quelconque, il y a toujours plus d'un rayon transmis. Mais, à côté des axes optiques relatifs aux ondes planes, qui sont pour elles des axes de double réfraction et ont la propriété de ne pouvoir être parcourus que par des ondes d'une seule vitesse, il existe deux autres axes, relatifs aux rayons isolés, qui diffèrent peu des premiers par leur position et qui, sans être des axes de double réfraction, possèdent une propriété analogue à celle qui caractérise les premiers axes, en ce qu'ils ne peuvent être parcourus que par des rayons d'une seule vitesse.

Lorsque la lumière émane d'un point de la surface ou de l'intérieur d'un corps, qui a été mis en vibration, elle se propage dans ce corps, tout autour du centre d'ébranlement, par des ondes courbes, de forme sphérique, si l'élasticité du milieu est la même en tous sens, et de forme sphéroïdale, si l'élasticité varie dans des directions différentes. Fresnel a calculé la surface des ondes pour le cas d'une élasticité variable : son équation peut être mise sous la forme suivante :

$$\frac{x^2}{r^2-a^2}+\frac{y^2}{r^2-b^2}+\frac{z^2}{r^2-c^2}=1,$$

dans laquelle on fait, pour abréger : $r^2=x^2+y^2+z^2$.

et qui sont compris dans le faisceau conique de ceux vergent vers l'œil.

ristaux biréfringents se partagent, eu égard au nombre s axes optiques, en *cristaux à un axe*, et *cristaux à deux* xaminons les différences que présentent ces deux classes aux, tant sous le rapport de la symétrie de leurs formes, s celui des deux sortes d'axes que nous venons de distin- voir : les axes d'élasticité, ou lignes pour lesquelles la bifur- es rayons réfractés est nulle, et les axes optiques, ou lignes vitesse, pour tous les larges faisceaux de rayons parallèles parcourent, dans quelque sens qu'ils soient polarisés, et aisceaux n'éprouvent jamais de double réfraction.

§ 8. *Des cristaux à un axe optique.*

les cristaux à un seul axe optique appartiennent aux s cristallins, dont les formes ont un axe principal de , leurs faces étant symétriquement placées par rapport ème ligne centrale, dont la direction est celle de l'axe Ces systèmes sont ceux qui dérivent des prismes droits hexagonale ou carrée (systèmes rhomboédrique et qua- e).

oujours dans ces cristaux un axe principal d'élasticité, dont ion se confond avec celle de l'axe optique, et par consé- ussi avec celle de l'axe de cristallisation. Ainsi, l'axe du t à la fois un axe optique et un axe d'élasticité. Cette réu-

hénomène des anneaux polarisés n'est que la traduction en carac- bles de ce fait, ou de cette proposition théorique que nous avons us haut, savoir : que la différence des vitesses des rayons diversement qui suivent une même direction, diminue de plus en plus à mesure direction se rapproche de l'axe, et devient nulle, quand la direction confondent. En effet, s'il en est ainsi, cette différence devra, comme les quantités variables qui approchent de leur limite, varier par des émement petits dans le voisinage d'un axe optique : par conséquent, e des retards éprouvés par les rayons sera elle-même très-petite ; une des conditions nécessaires pour que ces rayons puissent *inter-* oduire des couleurs. Mais ce n'est pas la seule ; car, on sait que des même direction n'interfèrent jamais, quand ils sont polarisés à angle ut donc encore que les deux rayons, qui ont suivi la même route stal, soient ramenés au même plan de polarisation, avant d'arriver à 'est à cela que sert la seconde tourmaline (ou le prisme analyseur) ; temps qu'elle éteint une portion de lumière, qui est juste le com- celle à laquelle sont dues les couleurs, et qui, si elle restait jointe à rétablirait à l'état de lumière blanche.

nion des deux sortes d'axes en une seule et même ligne n'a pas lieu dans la seconde catégorie des cristaux biréfringents. Mais, outre cet axe principal d'élasticité, il y en a une infinité d'autres que l'on peut appeler secondaires : car, toute droite perpendiculaire à l'axe optique est un axe d'élasticité ; et si, par un point quelconque de l'axe du cristal, on mène un plan normal à cet axe, ce plan comprendra toutes les directions des axes secondaires d'élasticité. Ce plan, remarquable par les propriétés particulières dont il jouit, est ce qu'on nomme la *section perpendiculaire*. On nomme *section principale*, toute section plane, faite dans le cristal, parallèlement à l'axe optique. Comme par une seule et même droite on peut faire passer une infinité de plans, il s'ensuit que, dans un cristal biréfringent à un axe, il y a une infinité de sections principales. Pour toute face extérieure du cristal, autre que celle qui est perpendiculaire à l'axe, il y a toujours une des sections principales, et seulement une, qui est perpendiculaire à cette face : c'est ce qu'on nomme la section principale relative à cette face ; et quand on étudie la double réfraction d'un cristal, on est convenu d'appeler, dans le cours de l'expérience, *section principale du cristal*, le plan parallèle à l'axe optique et perpendiculaire à la face quelconque, naturelle ou artificielle, par laquelle est entrée la lumière.

Les cristaux biréfringents à un axe ont encore cela de particulier, que des deux rayons dans lesquels se divise le faisceau incident, l'un se réfracte suivant la loi de Descartes, c'est-à-dire suivant la loi que suit la réfraction simple dans les substances non cristallisées, et l'autre suivant une loi toute différente. De là les noms de *rayon ordinaire*, et de *rayon extraordinaire*, qu'on leur donne. L'indice de réfraction du premier a une valeur constante : celui du second au contraire varie en général d'une direction à une autre. De plus, le plan dans lequel il se réfracte ne coïncide avec le plan d'incidence que dans des cas très-particuliers.

§ 9. *Expériences avec des rhomboèdres ou prismes de spath d'Islande.*

Les cristaux de spath d'Islande (carbonate de chaux incolore) sont très-propres à fournir la vérification de ces faits, et de beaucoup d'autres encore. Si l'on suppose qu'un faisceau lumineux rencontre une face quelconque d'un de ces cristaux, mais

une face oblique à l'axe, ce faisceau se dédoublera constamment. Si le cristal est un rhomboèdre, et qu'on le place par une de ses faces sur un papier où l'on aura tracé un point noir, en regardant ce point à travers le cristal, on apercevra deux images d'égale intensité. Dans le cas où l'on regardera bien perpendiculairement, en mettant l'œil juste au-dessus du point de mire, l'une des images sera vue à sa véritable place; l'autre paraîtra déviée d'un côté ou de l'autre : la première image est formée par les rayons ordinaires, et la seconde par des rayons extraordinaires. Lorsque l'on fera tourner le cristal autour de la verticale, l'image ordinaire restera fixe, l'image extraordinaire tournera autour de la première. Le plan normal qui renferme les deux images est toujours parallèle à la section principale de la face d'entrée. On pourra aussi constater l'existence de ces faisceaux, en faisant passer dans une chambre obscure un rayon solaire à travers le cristal : si ce rayon tombe normalement sur une face du rhomboèdre, une moitié traversera le cristal sans se dévier, et l'autre moitié éprouvera une réfraction très-sensible. On remarquera en même temps que le faisceau extraordinaire se dirigera toujours dans le plan de la *section principale*.

Si le cristal de spath a la forme d'un prisme hexagonal, et qu'on le place par une de ses bases ou par un de ses pans sur un point noir, en regardant par la face opposée, de manière que l'œil soit perpendiculaire à cette face, on ne verra qu'une seule image. La raison en est, que l'on vise alors dans la direction d'un axe d'élasticité, à travers des faces qui lui sont perpendiculaires. Mais pour peu qu'on s'écarte de la direction perpendiculaire d'un côté ou d'un autre, on voit à l'instant paraître la double image. Si la face tournée vers l'œil étant perpendiculaire à un axe d'élasticité, la seconde face lui était oblique, on aurait généralement des images doubles, excepté le cas où l'on regarderait dans la direction de l'axe principal, qui est en même temps celle de l'axe optique. Cette direction est donc la seule qui laisse voir des images simples, *à travers des faces inclinées*, et pour laquelle il n'y a pas de double réfraction. La ligne qui jouit de cette propriété n'est pas seulement un axe optique, elle est encore un axe principal de symétrie, aussi bien pour la structure que pour la forme du cristal. Aussi, l'observation montre-t-elle que les phénomènes de réfraction ont lieu exactement de la même manière tout autour de l'axe. Par exemple, si un rayon incident tombe, sous une certaine obliquité, sur la base d'un

prisme hexagonal de spath, que nous supposerons placé verticalement, on aura deux rayons réfractés faisant entre eux un angle déterminé; et, pour la même obliquité, l'écart des deux rayons sera constant, quel que soit celui des plans verticaux dans lequel se fera l'incidence. On remarquera de plus que le plan d'incidence contiendra toujours les deux rayons, parce qu'il est une section principale, et que, tout étant parfaitement symétrique à droite et à gauche de ce plan, il n'y aurait pas de raison pour que l'un des rayons s'en écartât plutôt d'un côté que de l'autre.

Nous avons déjà fait observer que la bifurcation des rayons n'était pas le seul fait qui résultât de l'action des cristaux sur la lumière. Les deux rayons dans lesquels se divise le faisceau incident ont changé de nature : ils sont tous deux *polarisés*, et dans des sens différents. On reconnaît aisément que les rayons provenant du dédoublement d'un faisceau qui a traversé un cristal d'Islande, sont distincts de la lumière naturelle, à ce qu'ils n'éprouvent plus *constamment* la double réfraction dans leur trajet à travers un second cristal, et que leur division, quand elle a lieu, se fait généralement d'une manière inégale. C'est ce que l'on voit en répétant l'expérience suivante, qui a été faite pour la première fois par Huyghens. Si l'on superpose deux rhomboèdres de spath, et que l'on observe les images d'un point extérieur, par exemple d'un point noir tracé sur un papier blanc, on verra varier le phénomène, selon la manière dont le rhomboèdre supérieur se trouvera orienté par rapport au rhomboèdre inférieur. Tout rayon qui traverse le premier, s'y divisant en deux, d'égale intensité, et chacun de ceux-ci paraissant devoir se dédoubler de même en traversant le second rhomboèdre, on s'attend naturellement à avoir quatre faisceaux émergents, et par conséquent quatre images distinctes, d'intensités sensiblement égales. Cependant, ce n'est pas ce qui a lieu généralement. On ne voit quatre images de même intensité, que quand les sections principales des deux rhomboèdres font entre elles un angle de 45°; pour toutes les autres inclinaisons, les images ont des intensités inégales; et quand les sections principales sont parallèles ou perpendiculaires, les images sont réduites à deux, par l'évanouissement complet des deux autres.

Supposons que les deux rhomboèdres superposés soient orientés de la même manière, c'est-à-dire que leurs sections principales soient parallèles. Les rayons provenant du premier ne se

;urqueront pas dans le second; le faisceau ordinaire ne don-ra pas d'image extraordinaire, il se réfractera tout d'une pièce, lon la loi de Descartes; le faisceau extraordinaire ne donnera s d'image ordinaire, il éprouvera tout entier la réfraction ex-iordinaire. On aurait des effets inverses, si les deux sections incipales se trouvaient rigoureusement à angles droits l'une r l'autre : le rayon qui serait ordinaire dans le premier cristal viendrait extraordinaire dans l'autre, et réciproquement. Il sulte évidemment de ces expériences, que dans le premier omboèdre les rayons lumineux ont changé de nature; que s nouveaux rayons, au lieu d'avoir tous leurs côtés semblables, mme les rayons de lumière naturelle, présentent des côtés de opriétés différentes, dans des points de leur contour, qui sont 90° l'un de l'autre; et qu'enfin, les deux rayons ordinaire et traordinaire ont reçu la même modification, mais seulement ns des sens différents et dans des plans respectivement per-ndiculaires. Le rayon ordinaire est toujours polarisé dans un an mené par ce rayon parallèlement à l'axe, par conséquent ns le plan de la section principale, si la lumière incidente est rmale à la face d'entrée; le rayon extraordinaire est polarisé ns un plan passant par ce rayon, et en même temps perpen-culaire au premier plan de polarisation.

§ 10. *Anneaux colorés circulaires, avec croix noire ou blanche.*

On peut, à l'aide de l'appareil aux tourmalines, reconnaître xistence et la position de l'axe optique, par le phénomène des ineaux colorés qui se produisent tout à l'entour; mais pour la, il est nécessaire d'avoir le cristal que l'on veut éprouver, illé soit naturellement, soit artificiellement, en plaque à faces rallèles, perpendiculairement à la direction de cet axe, qui t indiquée par la forme même du cristal. Toutes les substances in axe, taillées ainsi en plaques perpendiculaires, d'un degré nvenable d'épaisseur, et placées entre les lames de tourma-e croisées, laissent voir, lorsqu'on applique l'œil contre l'ap-reil, une série d'anneaux colorés, circulaires et concentriques ;. 70, pl. XVII), et traversés généralement par une croix noire nt les branches s'épanouissent en pinceau à leurs extrémités; s anneaux sont d'autant plus élargis, que la plaque est moins aisse. Ce phénomène de coloration ne varie point, si l'on

fait tourner dans son propre plan la plaque du minéral interposé; mais son aspect change avec la position de la seconde tourmaline, celle qui est du côté de l'œil. Si l'on fait faire à celle-ci un quart de révolution sur elle-même, la croix noire est alors remplacée par une croix blanche (fig. 71), et les couleurs des anneaux sont dans tous les points complémentaires de celles que l'on avait d'abord.

Les plaques de spath d'Islande de quelques millimètres d'épaisseur, et même de deux à trois centimètres, donnent des anneaux très-brillants et généralement très-réguliers. Mais un des plus beaux exemples que l'on puisse citer de ce curieux phénomène, est celui que l'on obtient avec un morceau de glace, produite par la congélation d'une eau pure et tranquille. On aperçoit de magnifiques anneaux, lorsqu'on regarde avec une tourmaline ou un prisme de Nicol et à travers un morceau de glace de quelques centimètres d'épaisseur, un corps capable de polariser la lumière par réflexion, sous une certaine incidence, tel qu'une plaque de verre noir, ou une table polie.

Les mêmes phénomènes s'observent généralement, avec des plaques suffisamment épaisses, de toutes les substances à un axe; mais il en est quelques-unes qui les montrent avec des circonstances toutes particulières. Quelquefois les anneaux sont légèrement ovales, et en tournant la plaque dans son plan, on voit les branches de la croix noire se contourner en divers sens: on attribue ces anomalies à des irrégularités accidentelles dans la structure du cristal. Lorsqu'on examine successivement les anneaux produits par chaque espèce de lumière homogène, lesquels sont alors alternativement noirs et de la couleur soumise à l'expérience, on trouve que généralement les diamètres des anneaux suivent la même loi que ceux des anneaux de Newton; et, comme dans le phénomène si bien analysé et décrit par le savant anglais, c'est la superposition partielle des anneaux de différentes teintes, qui engendre les anneaux irisés que l'on observe avec la lumière blanche. Il y a cependant des exceptions à cette conformité générale entre les deux phénomènes. Dans une variété d'apophyllite du Tyrol, et de l'île d'Utoë en Suède, les anneaux, qui sont très-nombreux, ne présentent point les nuances ordinaires; ils paraissent alternativement noirs et blancs, ce qui tient à ce que, dans cette substance, les diamètres des anneaux sont à peu près les mêmes pour toutes les couleurs du spectre : c'est pour cette particularité que

I. Herschell a donné le nom de *leucocyclite* à l'apophyllite du 'yrol.

Dans quelques variétés plus rares d'apophyllite, on observe ıne dégradation de teintes plus rapide que celle qu'indique l'échelle de Newton; ou même, les couleurs présentent une disposition en sens inverse de celle des anneaux formés par les lames ninces. Ce renversement de teintes a été remarqué aussi par I. Herschell dans les cristaux d'idocrase.

Le quarz hyalin, ou cristal de roche, montre une apparence le croix, qui est plus bleuâtre que noire, quand il est en plaque rès-mince : pour une épaisseur plus considérable, la croix disaraît presque entièrement, au moins dans la partie centrale; t on en aperçoit seulement des traces dans le champ qu'ocupent les anneaux : le centre de ceux-ci est alors marqué d'une einte uniforme. Mais ce phénomène tient à une action partiulière qu'exerce le quarz sur les rayons polarisés qui le traverent dans la direction de son axe; nous reparlerons bientôt de e phénomène, que nous étudierons à part, sous le nom de *poarisation circulaire*.

§ 11. *Distinction des cristaux positifs et des cristaux négatifs.*

Nous avons défini ci-dessus ce que l'on entend par la section erpendiculaire dans les cristaux à un axe, et nous avons dit que ette section jouissait d'une propriété remarquable. Et, en effet, ant que le faisceau de lumière incidente reste compris dans le lan de cette section, quel que soit l'angle sous lequel il tombe ur le cristal, l'indice du faisceau extraordinaire présente toujours alors une même valeur, mais qui est différente de celle de 'indice du rayon ordinaire; ainsi, pour ce plan seulement, mais lans toute son étendue, la marche du rayon extraordinaire 'assimile à celle du rayon ordinaire. Appelons n l'indice de ce lernier, et n' l'indice du rayon extraordinaire : n' aura une valeur onstante, aussi bien que n, dans la section perpendiculaire, et on pourra se proposer de comparer, dans chaque substance, es valeurs constantes de n et de n', ou de déterminer la différence $n'-n$. Or, de cette comparaison résulte, pour les substances à un axe, une distinction importante, qui a été signalée our la première fois par M. Biot.

Il est des substances à un axe, dans lesquelles l'indice extraordinaire n' est plus petit que l'indice ordinaire n; la différence

$n' - n$ est donc négative. Ces substances sont appelées pour cette raison des *cristaux négatifs*. Dans le spath d'Islande, ou calcaire spathique limpide et incolore, $n' = 1,483$, et $n = 1,654$. Le spath d'Islande est donc un cristal négatif. Au contraire, dans le cristal de roche ou quarz-hyalin incolore, $n' = 1,558$, et $n' = 1,548$; le cristal de roche est donc un cristal positif.

La valeur constante trouvée pour n' dans la section perpendiculaire, représente dans les cristaux négatifs le *minimum* des valeurs variables de l'indice extraordinaire, lesquelles sont constamment moindres que n; elle représente au contraire dans les cristaux positifs, le *maximum* des valeurs de l'indice extraordinaire, lesquelles sont constamment plus grandes que n. Il suit de là que dans tout autre plan d'incidence que la section perpendiculaire, n' sera encore plus petit que n dans les cristaux négatifs, et plus grand au contraire dans les cristaux positifs. Or, quand n' est *plus grand* que n, le sinus de l'angle de la réfraction extraordinaire est plus petit que celui de la réfraction ordinaire; le rayon extraordinaire se rapproche donc plus de la normale, ou, en d'autres termes, est plus fortement réfracté que le rayon ordinaire; et c'est le contraire qui a lieu, lorsque n' est plus petit que n. Donc, l'image extraordinaire est toujours *plus déviée* que l'image ordinaire, dans les cristaux *positifs*; et toujours *moins déviée*, dans les cristaux *négatifs*.

Si la face sur laquelle le cristal reçoit la lumière est perpendiculaire à l'axe optique, le plan d'incidence est alors une section principale, et la normale se confondant avec l'axe, il est clair que dans ce cas le rayon extraordinaire se rapprochera plus de l'axe que le rayon ordinaire, si le cristal est positif, et s'en éloignera davantage, si le cristal est négatif. En cherchant à se rendre compte de cette différence, dans le système de l'émission, M. Biot a supposé que la double réfraction résultait d'une force particulière émanant de l'axe, qui s'exerçait sur une certaine portion de lumière seulement, en s'ajoutant à la cause d'où provenait la réfraction ordinaire, et qui était attractive dans certaines substances, et répulsive dans d'autres. De là la distinction établie par lui entre la double réfraction attractive, et la double réfraction répulsive; et les dénominations de *cristaux attractifs* et de *cristaux répulsifs*, par lesquelles il désignait les deux classes de cristaux, que nous nommions tout-à-l'heure positifs et négatifs.

La vitesse de propagation des rayons est d'autant plus petite

qu'ils sont plus fortement réfractés. Le rayon extraordinaire doit donc marcher moins vite que le rayon ordinaire dans les cristaux positifs; et marcher plus vite au contraire dans les cristaux négatifs. Ajoutons à cela que l'axe optique coïncide avec l'axe de plus petite élasticité dans les premiers, et avec l'axe de plus grande élasticité dans les seconds.

La détermination du sens de la double réfraction ou du caractère de l'axe optique, dans les cristaux uniaxes, peut être très-utile en minéralogie, pour confirmer les réunions ou les séparations d'espèces. Il résulte des belles recherches de M. de Sénarmont et de M. Descloizeaux sur les propriétés optiques biréfringentes, que ce caractère ne varie pas dans les véritables espèces simples, c'est-à-dire dans les minéraux purs, formés d'une seule sorte de molécules; mais dans les cristaux à structure non homogène, comme certains cristaux d'apophyllite, les propriétés optiques peuvent varier, au point de s'y manifester avec des signes contraires, et c'est aussi ce qui a lieu dans les cristaux mixtes ou les mélanges isomorphiques, selon la prédominance de telle ou telle sorte de molécules isomorphes (1).

Pour opérer cette détermination d'une manière rigoureuse, par la recherche des constantes appelées les élasticités principales, on s'appuie sur ce résultat fourni par la théorie de la double réfraction, que la vitesse de propagation des vibrations parallèles à un axe d'élasticité, est en raison inverse de l'indice de réfraction d'un rayon lumineux, qui serait dirigé et en même temps polarisé perpendiculairement à cet axe. D'après cela, si a est la vitesse principale de propagation des vibrations parallèles à l'axe optique, $\frac{1}{a}$ sera égal à n', ou à l'indice de réfraction du rayon extraordinaire dans le plan de la section perpendiculaire; et pour avoir $\frac{1}{a}$, il faudra tailler le cristal en prisme dont l'arête soit parallèle à l'axe optique, et chercher par le procédé indiqué p. 364, l'indice de réfraction d'un rayon incident, dirigé et en même temps polarisé perpendiculairement à cette arête. Si b est la vitesse de propagation des vibrations perpendi-

(1) *Recherches sur les propriétés optiques biréfringentes des corps isomorphes*, par M. de Sénarmont (*Annales de Chimie et de Physique*, tome XXXIII, p. 391); et *De l'emploi des propriétés optiques biréfringentes en Minéralogie*, par M. Descloizeaux (*Annales des Mines*, tome XI, p. 261).

culaires à l'axe optique, $\frac{1}{b}$ sera égal à n, ou à l'indice de réfraction du rayon ordinaire, que l'on déterminera en se servant d'un rayon incident, polarisé parallèlement à l'axe, et dirigé comme le précédent dans la section perpendiculaire.

Connaissant maintenant a et b, si l'on trouve que a est plus grand que b, on en conclura que l'axe optique coïncide avec l'axe de plus grande élasticité, et que par conséquent le cristal est négatif.

Mais il n'est pas absolument nécessaire de chercher les valeurs des deux indices principaux, pour déterminer le caractère de l'axe optique, il suffit pour cela de connaître l'ordre de grandeur de ces indices. Voici des moyens plus simples de s'assurer si un cristal uniaxe est positif ou négatif.

Supposons que le cristal présente naturellement par sa forme, ou par suite de la taille qu'on lui aura fait subir, un *prisme réfringent*, c'est-à-dire un angle dièdre, dont les deux faces, et par conséquent aussi leur arête d'intersection, soient parallèles à l'axe optique. Il suffira d'observer un objet délié à travers ce prisme, et de déterminer au moyen d'une plaque de tourmaline le sens de polarisation des deux images. On reconnaîtra de cette manière laquelle des deux sera l'image extraordinaire : car, on sait que dans tous les cristaux à un axe, quel que soit le caractère de leur double réfraction, l'image ordinaire est toujours polarisée parallèlement à l'axe, et par conséquent l'image extraordinaire dans un sens opposé (voy. p. 381). Celle-ci disparaîtra donc, quand l'axe de la tourmaline sera perpendiculaire à l'arête du prisme réfringent. Ayant ainsi reconnu l'image extraordinaire, il ne s'agira plus que de voir si elle est plus ou moins déviée que l'image ordinaire. D'après ce qui a été dit plus haut, si elle est plus déviée, le cristal est positif; il est négatif dans le cas contraire.

Au lieu d'avoir un prisme de la substance taillé parallèlement à l'axe, si l'on possédait une lame épaisse de cette même substance, taillée à faces parallèles à l'axe, on pourrait lui faire produire des couleurs dans l'appareil aux tourmalines, en l'accouplant avec une autre lame d'un cristal à un axe taillé de la même façon, et dont on connaisse d'avance le caractère optique. Il suffit pour cela de placer les deux lames l'une sur l'autre, de manière que leurs sections principales soient parallèles ou perpendiculaires. Si la coloration est produite par l'accouplement

parallèle, les deux lames seront de caractères opposés : si elle a lieu par la duplication croisée, les deux lames sont de même signe, c'est-à-dire toutes deux positives, ou toutes deux négatives. Par exemple, en accolant une lame de spath d'Islande avec une lame de quarz d'une épaisseur convenable, par la duplication parallèle, on obtient une imagée colorée avec la pince aux tourmalines. Cela vient de ce que, par suite de la disposition adoptée, celui des deux rayons réfractés qui a marché plus vite que l'autre dans la première lame, se propage au contraire moins vite dans la seconde; la seconde lame compense donc en partie l'effet produit par la première, la différence des retards se trouve diminuée et peut devenir très-petite; circonstance qui détermine l'apparition des couleurs.

On se sert avec avantage, pour trouver l'épaisseur qui convient au développement des couleurs par compensation, d'une lame légèrement prismatique de quarz, dont les faces soient parallèles à l'axe optique, et on l'associe à une autre lame parallèle, par l'un ou l'autre des modes de duplication, en ayant soin de placer l'axe du quarz à 45 degrés du plan de la polarisation primitive. Une pareille lame de quarz, placée dans un faisceau parallèle de lumière polarisée, laisse voir des bandes colorées parallèles, lorsqu'on la regarde d'un peu loin, soit avec une tourmaline, soit même à l'œil nu.

Si l'on avait une plaque de la substance à déterminer, taillée perpendiculairement à l'axe, et propre à donner les anneaux polarisés dans l'appareil aux tourmalines, il suffirait de lui associer une autre plaque d'un cristal dont le caractère serait connu d'avance, par exemple une plaque négative de calcaire spathique, et de voir si par la superposition des deux plaques, les anneaux se dilatent ou se resserrent. Si l'on voit les anneaux se rétrécir, c'est que la plaque additionnelle est de même signe que le cristal à déterminer, et par conséquent celui-ci doit être négatif : on sait en effet que les anneaux se rétréciraient par l'augmentation seule de l'épaisseur de la plaque; or, la doubler par une plaque d'une autre nature, et qui agisse dans le même sens, cela revient à augmenter seulement l'épaisseur de la première. Si par l'addition d'une lame de calcaire, les anneaux s'élargissent, c'est comme si l'on avait diminué l'épaisseur de la plaque; les deux substances exercent donc des actions contraires, et par conséquent le cristal à déterminer est positif.

Nous donnerons ici, d'après M. Brewster, et les recherches

plus récentes de M. Descloizeaux, une liste des principales substances minérales, à un axe, avec l'indication du caractère de leur double réfraction.

TABLEAU DES CRISTAUX BIRÉFRINGENTS, A UN AXE.

Cristaux négatifs.

Calcaire spathique.	*Système rhomboédrique*
Dolomie.	*id.*
Sidérose.	*id.*
Ankérite.	*id.*
Smithsonite.	*id.*
Nitrate de soude.	*id.*
Argent rouge.	*id.*
Lévyne.	*id.*
Tourmaline.	*id.*
Corindon.	*id.*
Alunite.	*id.*
Eukolite.	*id.*
Pennine du Tyrol et du Valais. . .	*id.*
Apatite.	*Syst. dirhomboédrique.*
Pyromorphite.	*id.*
Mimétèse.	*id.*
Érinite (cuivre arséniaté).	*id.*
Béryl.	*id.*
Biotite (mica à un axe du Vésuve). .	*id.*
Néphéline.	*id.*
Mellite.	*Système quadratique.*
Anatase.	*id.*
Plomb molybdaté.	*id.*
Chalcolite.	*id.*
Wernérite.	*id.*
Méionite.	*id.*
Gehlénite.	*id.*
Dipyre.	*id.*
Apophyllite de Bannat.	*id*
Idocrase.	*id.*
Somervillite.	*id.*
Édingtonite.	*Système sphénoédrique*

Cristaux positifs.

Quarz	*Système rhomboédrique.*
Cinabre	*id.*
Glace	*id.*
Eudialyte	*id.*
Phénakite	*id.*
Dioptase	*id.*
Willémite	*id.*
Chabasie	*id.*
Greenockite	*id.*
Hydrate de magnésie	*Syst. dirhomboédrique.*
Parisite	*id.*
Apophyllite d'Utoë	*Système quadratique.*
Oxahvérite	*id.*
Zircon	*id.*
Oxyde d'étain	*id.*
Rutile	*id.*
Calomel	*id.*
Schéelite	*id.*

§ 12. *Des cristaux à deux axes optiques.*

Les cristaux à deux axes optiques appartiennent aux systèmes prismatiques, autres que les systèmes hexagonal et quadratique, à ceux dont les formes fondamentales ont trois axes de symétrie, inégaux, dont aucun ne remplit le rôle d'axe principal. Ces systèmes sont : le système orthorhombique, le klinorhombique et le klinoédrique.

Les deux axes optiques font entre eux un angle qui varie d'une substance à une autre, mais qui, pour la même espèce, n'éprouve pas de changement, pourvu que les cristaux soient pris à la même température et dans les mêmes conditions de pureté et de composition chimique. On nomme *ligne moyenne*, celle qui divise en deux parties égales le plus petit des angles formés par les deux axes, et *ligne supplémentaire*, une seconde moyenne, qui partage de la même manière le plus grand angle, supplément du premier. Il est clair que ces deux lignes sont comprises dans un seul et même plan avec les axes optiques.

Nous avons vu que dans les cristaux à un axe, l'axe optique

se confondait toujours avec l'axe cristallographique ou la ligne principale de symétrie. Dans les cristaux à deux axes, la position de ceux-ci ne peut plus être définie d'une manière aussi rigoureuse par les axes de cristallisation, bien qu'il y ait encore dans le plus grand nombre des cas une relation évidente entre les deux espèces d'axes. Ainsi, dans les cristaux du système rhombique, la ligne moyenne se confond toujours avec l'un des axes rectangulaires de cristallisation, et le plan des axes optiques avec l'un des trois plans principaux formés par ces axes. Dans le système klinorhombique, la ligne moyenne, ou la ligne supplémentaire, est toujours comprise dans celle des sections verticales, qui partage chaque cristal en deux moitiés, droite et gauche, parfaitement symétriques; mais cette ligne peut d'ailleurs être inclinée plus ou moins sur l'axe ou sur la base du cristal (1). Le plan des axes se confond avec le plan de symétrie dont nous venons de parler (exemples : gypse, euclase, diopside); ou bien il lui est perpendiculaire (talc; borax). Dans le système klinoédrique, aucune indication simple ni générale ne saurait être donnée, relativement à la position de la ligne moyenne, ou du plan des axes.

Dans les cristaux à deux axes, les axes d'élasticité sont au nombre de trois seulement, et perpendiculaires entre eux. L'un de ces axes est la ligne moyenne, le second est la ligne supplémentaire, et le troisième est la ligne perpendiculaire aux deux autres, et en même temps au plan des deux axes optiques. Ces trois droites jouissent seules de la propriété qui, dans les cristaux à un axe, caractérise toutes les droites perpendiculaires à cet axe. Ces axes d'élasticité déterminent par leur combinaison deux à deux trois plans ou trois sections remarquables, dont une (la plus importante des trois) est le plan même des axes. Celle-ci se nomme plus particulièrement la *section principale*; les deux autres, qui sont perpendiculaires aux lignes moyennes, sont les *sections perpendiculaires*. Celui des axes d'élasticité, dans lequel elles se rencontrent, est l'axe de moyenne élasticité (ou, plus simplement, l'axe moyen); les deux autres, contenus dans la section principale, correspondent l'un à la plus grande élasticité du milieu biréfringent, et l'autre à la plus petite. Dans le système orthorhombique, les trois axes d'élasticité se confondent

(1) Il suit de là que les axes d'élasticité ne sont pas toujours des axes de symétrie pour le cristal, comme ils le sont sans doute pour le milieu éthéré, qui remplit ses interstices.

toujours avec les trois axes rectangulaires de l'octaèdre fondamental; dans le klinorhombique, *un* des axes d'élasticité coïncide toujours avec la diagonale horizontale ou la normale au plan de symétrie, et les deux autres sont constamment dans ce plan.

Dans les cristaux à deux axes optiques, aucun des deux rayons dans lesquels se divise le faisceau incident n'obéit constamment à la loi de la réfraction ordinaire; la vitesse de propagation varie généralement pour l'un, comme pour l'autre, et par conséquent aussi l'indice de réfraction de chaque rayon. Il n'y a donc plus ici, à proprement parler (1), de rayon ordinaire; les rayons réfractés sont tous deux extraordinaires, étant soumis à une loi plus compliquée que la loi de Descartes, et analogue à celle qui régit la marche du second rayon dans les cristaux à un axe. Ce point a été parfaitement bien établi par Fresnel, à qui l'on doit la théorie complète des phénomènes de double réfraction, à un ou deux axes (2).

Bien que les deux rayons réfractés se meuvent, comme nous venons de le dire, avec des vitesses généralement variables, il arrive cependant à ces rayons, ce que nous avons remarqué dans la marche du rayon extraordinaire des cristaux à un axe : c'est que leur vitesse peut devenir constante dans certains plans déterminés; mais cette circonstance n'a jamais lieu que pour *trois* (3) plans; et dans chacun de ces plans, pour un seul des deux rayons seulement. Ces trois plans sont ceux de la section principale, et des deux sections perpendiculaires. Lorsque le rayon incident se meut dans le plan perpendiculaire à la ligne moyenne, un des deux rayons réfractés prend une vitesse constante, égale à la vitesse *maxima* ou *minima;* lorsque le rayon incident se meut dans le plan perpendiculaire à la ligne supplémentaire, un des rayons réfractés a une vitesse constante, égale

(1) Cependant, comme dans le plus grand nombre des substances connues, il arrive que pour l'un des rayons les variations de vitesse sont beaucoup moins sensibles que pour l'autre, on peut continuer à appeler ce rayon *ordinaire*, par analogie avec la dénomination adoptée pour les cristaux à un axe.

(2) M. Biot a déduit de l'expérience une règle pour déterminer le sens de polarisation des deux faisceaux réfractés. Le faisceau ordinaire est polarisé suivant le plan intermédiaire entre ceux que l'on peut mener par ce rayon et par les deux axes; le faisceau extraordinaire l'est perpendiculairement au plan intermédiaire mené par ce rayon, suivant les mêmes conditions.

(3) La plupart des auteurs n'indiquent l'existence de cette propriété que pour les deux sections perpendiculaires, bien qu'elle ait lieu aussi pour le plan des axes. (Voir l'Appendice.)

à la vitesse *minima* ou *maxima;* enfin, lorsque le rayon incident est contenu dans le plan des axes, un des rayons réfractés se meut encore avec une vitesse constante, égale à la *vitesse moyenne*.

Dans les cristaux à deux axes, il n'y a plus d'images qui soient réellement simples à travers des faces inclinées, dont une (celle contre laquelle on applique l'œil) est perpendiculaire à un axe. Tout rayon incident normal à une face perpendiculaire à un axe se divise toujours en deux rayons réfractés, dont un se dirige suivant l'axe, et dont l'autre s'en écarte, à la vérité, d'une quantité ordinairement très-faible. Il n'existe donc dans ces cristaux aucune direction dans laquelle la double réfraction disparaisse.

§ 13. *Anneaux colorés, traversés par une ligne noire.*

Dans les cristaux à un seul axe, la marche des phénomènes était exactement la même tout autour de l'axe, l'intensité de l'action biréfringente ne dépendant que de l'inclinaison du rayon sur cet axe unique. Dans les cristaux à deux axes, il n'y a plus de similitude d'effets dans tous les plans passant par l'une de ces directions, ni par aucune autre ligne. Si l'on taille la substance en plaque perpendiculairement à l'un des axes, et qu'on la place dans l'appareil aux tourmalines, de manière à obtenir des couleurs polarisées, on apercevra un système d'anneaux, de forme généralement ovale; et ce système sera partagé en deux portions inégales par une ligne noire, ayant la forme d'une courbe hyperbolique, et passant par le centre des anneaux, c'est-à-dire par le pôle de l'axe optique (fig. 73). Un second système tout-à-fait pareil s'observerait autour du second axe, si le faisceau polarisé était dirigé dans le sens de cet axe. Les anneaux de chaque système sont plus larges du côté de la convexité de la ligne noire, laquelle regarde toujours l'autre système. Ils sont d'ailleurs d'autant plus serrés entre eux et rétrécis, que la plaque est plus épaisse. Enfin, la ligne noire qui les traverse prend successivement des positions et des courbures différentes, à mesure que l'on fait tourner la plaque du minéral dans son propre plan.

Les anneaux colorés, ainsi que les lignes noires croisées qui les traversent, n'éprouvaient, dans les cristaux uni-axes, aucun changement, quand on tournait la plaque dans son propre plan

entre les deux tourmalines. Dans les cristaux bi-axes, la position des anneaux est liée à celle des axes optiques : si l'on fait tourner la plaque cristalline, les anneaux colorés tournent en même temps que le plan des axes, et les lignes noires, qui ne dépendent que de la direction des axes des tourmalines, changent de situation relativement aux lignes colorées.

Si la plaque du minéral a été taillée perpendiculairement à la ligne moyenne, et si les deux axes font entre eux un angle assez petit, pour que chacun d'eux puisse être compris dans le cône des rayons polarisés qui convergent vers l'œil, on aperçoit à la fois les deux systèmes d'anneaux, et le centre de chaque système indique le pôle de l'axe autour duquel il se forme. C'est ce qui a lieu dans la céruse ou carbonate de plomb, la strontianite ou carbonate de strontiane, la withérite ou carbonate de baryte, dans le nitre ou azotate de potasse, dans le talc laminaire, dans l'arragonite, etc. Le nitre et la céruse sont les substances qui se prêtent le mieux à l'étude de ces curieux phénomènes. La figure 74 représente la forme générale des anneaux dans le nitre, abstraction faite des bandes noires. On voit que les premiers anneaux, qui entourent chaque pôle, sont d'abord isolés, et presque uniformément concaves ; puis ils se réunissent en une seule courbe, en forme de 8, et au-delà on n'a plus que des courbes simples, environnant à la fois les deux pôles, et dont les premières offrent des deux côtés des portions rentrantes ou des ventres, tandis que les plus extérieures reprennent une concavité sensiblement uniforme. Ces courbes ressemblent à celles que les géomètres nomment des *lemniscates*.

Si l'on fait tourner la lame de nitre entre les tourmalines, celles-ci restant immobiles, on verra les courbes obscures changer de place par rapport aux anneaux, et offrir dans leurs positions et dans leur courbure, des variations périodiques qui se reproduiront les mêmes à chaque quart de révolution. La figure 75 représente l'apparence du phénomène au moment où la rotation va commencer. A cet instant, la section principale de la plaque ou le plan des axes coïncide avec le plan de polarisation du faisceau incident ; alors la bande obscure de chaque système prend la direction de ce plan, et se prolonge jusqu'à ce qu'elle aille rejoindre celle de l'autre système ; au point milieu entre les deux pôles, elle est coupée perpendiculairement par une autre bande obscure, en sorte qu'on voit dans ce cas une apparence de croix noire, mais dont une seule branche passe par les

centres. Cette circonstance, jointe à la forme des anneaux empêchera toujours de confondre cette espèce de croix, avec celle que donnent les cristaux à un axe. Maintenant si, à partir de cette position de la plaque, on commence à la faire tourner dans son plan, d'abord d'une quantité très-petite, chaque bande centrale se déforme et se courbe légèrement, comme on le voit figure 76; lorsque la rotation a atteint $22° \, {}^1/_2$, on a l'apparence représentée figure 77; et pour une rotation de 45°, celle qui est représentée figure 78. Au-delà, les mêmes dispositions se reproduisent en sens contraire; et ainsi de suite, pour chaque quart de révolution.

Si les deux axes optiques font entre eux un angle un peu grand, il n'est plus possible d'embrasser à la fois dans le champ de l'appareil les deux systèmes d'anneaux, et l'on ne peut qu'observer successivement l'un et l'autre système, en inclinant la lame du minéral dans un sens, puis dans un autre, sur le rayon polarisé transmis par la première tourmaline. C'est ce qui a lieu pour la topaze, et pour certains micas, dont les deux axes sont compris dans un plan perpendiculaire aux lames de clivage. Supposons que l'on veuille reconnaître la direction des axes dans une lame de mica, on commencera par faire tourner la lame de mica dans son propre plan, et l'on trouvera deux positions dans lesquelles toute lumière s'évanouira, et où la lame interposée n'agira plus pour changer la polarisation du rayon transmis par la première tourmaline. Si pour chacune de ces positions, on trace sur la lame de mica la ligne de section de cette lame par le plan de polarisation de la lumière incidente (lequel est perpendiculaire à l'axe de la tourmaline), on verra que ces deux sections ou lignes neutres font entre elles un angle droit. L'une de ces sections est la section principale, ou le plan des deux axes. Pour la reconnaître, il faut incliner successivement la lame autour de chacune des deux lignes. Il y en aura une pour laquelle l'inclinaison dans un sens fera paraître les anneaux, ce qui indique que le faisceau se transmet alors suivant l'un des axes; en inclinant de la même quantité, en sens contraire, autour de la même droite, on trouvera une nouvelle position pour laquelle les anneaux reparaîtront, et qui fera connaître par conséquent la direction du second axe.

Les axes dont il a été question jusqu'ici dans ce paragraphe, ne sont axes de double réfraction que pour les ondes lumineuses planes ou les larges faisceaux de lumière, partis d'un

point infiniment éloigné, et non pour les rayons isolés, qui seraient émanés d'un point très-rapproché. Mais, comme nous l'avons fait observer, dans la note de la page 381, tout à côté de ces axes relatifs aux ondes planes, et, dans le même plan, il en existe deux autres qui se rapportent à ces rayons, et qui sont en quelque sorte des axes secondaires. Ainsi, outre les axes d'élasticité et les axes optiques ordinaires, les cristaux bi-axes possèdent une troisième sorte d'axes que nous signalons en passant, non-seulement comme une particularité curieuse, mais encore comme une nouvelle preuve de la complication de plus en plus grande du phénomène que nous étudions, à mesure que la symétrie du cristal devient moins simple. Nous ajouterons que (moyennant certaines précautions fort délicates) les physiciens ont pu observer dans la direction des axes optiques ordinaires, et dans celle des nouveaux axes optiques, non plus une simple bifurcation des rayons lumineux, mais une division infinie, un épanouissement du faisceau sous forme conique, phénomène tout-à-fait inattendu, que la belle théorie de Fresnel avait indiqué aux observateurs, avant que l'expérience en eût constaté la réalité.

Les axes optiques ordinaires sont, pour les rayons de lumière isolés, des axes de réfraction conique intérieure. Si le cristal est taillé en plaque à faces parallèles, perpendiculairement à l'un de ces axes, le rayon incident normal se réfractera intérieurement en un tube conique, lequel se changera en un tube cylindrique à l'émergence, en sorte que le faisceau émergent projettera, sur un écran perpendiculaire à sa direction, une image annulaire, dont le diamètre ne variera pas avec la distance à l'écran.

Les axes optiques de seconde espèce sont des axes de réfraction conique extérieure, c'est-à-dire qu'un faisceau unique de rayons parallèles polarisés dans tous les sens, et se mouvant le long d'un de ces axes optiques, se transforme à la sortie en un tube conique de rayons divergents, qui forme encore sur un écran un anneau lumineux, mais dont le diamètre varie cette fois avec la distance au cristal.

Nous avons dit (pag. 389) que les deux axes optiques faisaient entre eux un angle qui, toutes choses égales d'ailleurs, était constant dans les cristaux d'une même substance. Si les cristaux que l'on compare sont à la même température, et dans les mêmes conditions de structure et de composition chimique, et

si, de plus, la lumière qui donne les anneaux est de la même espèce, soit naturelle, soit simple et de même couleur, on trouvera toujours la même valeur pour l'écartement des deux axes. Il n'en serait plus de même, s'il y avait quelque variation dans la structure, ou dans la composition moléculaire des cristaux; ou bien, si l'on examinait ceux-ci à une même température avec de la lumière diversement réfrangible, ou avec la même sorte de lumière à des températures différentes. M. Herschell a reconnu que les axes optiques varient de position pour chaque couleur du spectre dans le même cristal : cette variation est surtout sensible dans les cristaux du sel de Seignette ou de la Rochelle (tartrate de soude et de potasse). Dans cette substance, les axes optiques sont dans un même plan pour tous les rayons colorés, c'est-à-dire dans le plan de la section principale; et l'intervalle angulaire compris entre les axes est plus grand pour le rouge que pour le violet; la différence, pour ces couleurs extrêmes s'élève jusqu'à vingt degrés. L'angle des axes va de même en décroissant, depuis le rouge jusqu'au violet, dans le carbonate de plomb, la topaze, etc. Au contraire, dans le nitre, dans l'arragonite, l'angle des axes relatifs à chaque couleur élémentaire croît avec le degré de réfrangibilité de cette couleur.

Dans tous les cristaux que nous venons de mentionner, et peut-être aussi dans tous ceux qui sont à axes rectangulaires, la dispersion ou séparation des axes relatifs aux diverses couleurs, a constamment lieu dans le plan de la section principale; les plans des différents couples d'axes se confondent. Il ne paraît pas en être de même pour les cristaux du système klinorhombique, si l'on en juge d'après les observations faites sur le borax par MM. Herschell et Delezenne (1). Dans ce sel, les plans des axes correspondants aux diverses couleurs se séparent à leur tour : ils éprouvent une rotation dans le même sens depuis le rouge jusqu'au violet.

Le changement de valeur dans l'angle des axes peut aller jusqu'à amener la réunion des deux axes en un seul. M. Brewster a reconnu que la glaubérite, qui, d'après sa forme cristalline, doit être une substance à deux axes, a en effet, pour le rouge du spectre, deux axes inclinés entre eux de deux à trois degrés, tandis qu'elle n'en a qu'un pour la couleur violette.

Les propriétés optiques bi-réfringentes d'un minéral cristal-

(1) *Notes sur la polarisation,* par M. Delezenne; p. 31. (Extrait des *Mémoires de la Société royale des Sciences de Lille,* pour 1834.)

lisé peuvent éprouver des modifications considérables par l'influence de molécules isomorphes interposées entre les siennes propres. M. de Sénarmont a fait voir (1) que des sels isomorphes, chimiquement et géométriquement, peuvent avoir des propriétés optiques fort différentes, ce qu'on était loin de soupçonner; leurs axes optiques peuvent s'ouvrir autour d'une même bissectrice, mais dans deux sections principales différentes. Ces sels, mélangés par la cristallisation dans des rapports divers, modifient leurs propriétés optiques opposées par une sorte de concession réciproque, et peuvent former des cristaux mixtes, où l'écartement angulaire des axes, continuellement variable avec les proportions des sels dans le mélange, s'annule quelquefois, ou vient se placer dans l'une ou dans l'autre des sections principales de la même forme géométrique, selon que les sels sont unis en quantités optiquement équivalentes, ou selon que l'un ou l'autre domine dans le cristal mixte.

L'action de la chaleur exerce aussi sur les propriétés optiques des cristaux, une influence très-marquée : en effet, par l'inégale dilatation qu'elle fait éprouver aux cristaux, elle en modifie la structure, et tend à lui imprimer des caractères tout différents de ceux qu'elle manifestait à la température ordinaire. Or, ces modifications de structure se traduisent nécessairement par des changements correspondants dans les propriétés optiques. Comme, d'après les expériences de M. Mitscherlich, le rhomboèdre du spath d'Islande devient moins obtus par l'action de la chaleur, et approche de plus en plus du cube, on doit s'attendre à voir diminuer son pouvoir biréfringent par la même cause : c'est en effet ce que ce savant physicien a reconnu par des mesures directes. Suivant ce que rapporte M. Herschell, dans son traité de la lumière, M. Mitscherlich aurait même découvert un fait plus singulier encore : le gypse ou sulfate de chaux hydraté, qui à la température ordinaire a ses deux axes optiques dans le plan de ses lames, inclinés de 60° l'un sur l'autre, subit une telle altération par l'élévation de la température, que les axes se rapprochent et finissent par se réunir; et si la chaleur est poussée plus loin, ils se séparent de nouveau, mais cette fois dans un plan perpendiculaire à celui des lames.

Nous avons vu comment, sous l'influence de certaines causes appréciables, des cristaux à deux axes pouvaient se trouver changés momentanément en cristaux à un axe; l'effet contraire,

(1) Mémoire déjà cité sur les propriétés optiques des corps isomorphes.

c'est-à-dire la séparation d'un axe unique en deux axes distincts, se voit quelquefois dans les cristaux des systèmes hexagonaux ou quadratiques; mais elle y est toujours la conséquence d'une irrégularité dans le cristal. On rencontre quelquefois des échantillons de quarz ou de béryl, dont l'axe ordinairement unique se partage en deux; les anneaux colorés prennent alors une forme ovale, et la croix noire se change en courbes, opposées par leurs convexités, et dont les sommets se retrouvent presque en contact à chaque quart de révolution de la lame dans son plan. Quand l'axe est unique, la croix n'éprouve aucun changement par l'effet de cette rotation.

Nous venons d'examiner les différentes causes qui peuvent faire varier l'écartement des axes optiques, dans les substances à deux axes. Comme les observations, pour être comparables, se font d'ordinaire dans des circonstances où ces influences sont presque complètement nulles, il en résulte que l'angle des axes optiques constitue un caractère physique d'une assez grande valeur, et qu'il importe de pouvoir le déterminer, sinon avec une précision rigoureuse, ce qui serait très-difficile, du moins avec un degré suffisant d'approximation. Or, c'est à quoi l'on parvient par l'observation des teintes polarisées, ou des systèmes d'anneaux que donnent les lames cristallines, quand elles sont soumises aux appareils ordinaires de polarisation, sous de certaines obliquités que l'on mesure.

Avant d'aller plus loin, remarquons qu'il n'est pas toujours nécessaire, pour voir les anneaux, de tailler et de polir un cristal dans une direction plane, peu différente de celle qui est perpendiculaire à un axe. On peut, avec une plaque à faces parallèles, observer les anneaux sous de très-grandes obliquités, en employant divers artifices, par exemple, en plongeant la lame dans de l'huile, ou en collant sur ses faces des prismes de verre, de même angle réfringent, et symétriquement placés, comme on le voit fig. 72. Ce moyen dispense le plus souvent de faire tailler et polir les cristaux dans plusieurs sens.

§ 14. *Mesure de l'angle des axes optiques.*

Pour mesurer l'angle des deux axes dans une plaque à faces parallèles, par exemple dans une plaque de topaze, donnée par le clivage, et dont les faces sont perpendiculaires à la ligne moyenne, on placera cette plaque dans un appareil de polari-

sation, qui permette de l'incliner plus ou moins sur les rayons polarisés, et de connaître par le moyen d'un cercle divisé, la valeur de l'inclinaison qu'on lui aura donnée. Puis on cherchera à déterminer l'angle qu'il faudra faire décrire à la plaque, autour de la droite perpendiculaire à la section principale, pour passer d'un système d'anneaux à l'autre, en ayant soin d'amener successivement dans la même position le centre de chaque système. M. Soleil a disposé un appareil fort commode pour ce genre d'observation.

Mais il importe de remarquer que cette expérience ne donne pas immédiatement l'angle réel compris entre les deux axes optiques *au-dedans* du cristal, mais seulement l'angle apparent, formé par les rayons émergents, qui ont traversé le cristal dans la direction de ses axes. Il faut donc corriger ce dernier angle, de l'effet de réfraction que les rayons ont éprouvée en repassant du cristal dans l'air, ce qui pourra donner pour l'angle intérieur une valeur *très-différente* de celle que l'instrument aura fournie pour l'angle extérieur. La différence peut aller du simple au double (1). Ainsi, dans la topaze que nous avons prise pour exemple, M. Brewster a trouvé que l'angle apparent ou extérieur, ou la rotation mesurée par l'appareil, était de 121° 16'; tandis que l'angle intérieur ou réel des deux axes, déduit du précédent par le calcul, n'était que d'environ 65°. De même, dans un certain mica à deux axes, dont la section principale se trouvait aussi perpendiculaire à la direction des feuillets, l'angle extérieur a fourni pour mesure 70° 6'; mais l'indice de réfraction du mica étant 1, 5, un angle d'incidence égal à $\frac{1}{2}$ (70° 6'), ou à 35° 3' correspondait à un angle de réfraction de 22° 31'; la direction de chacune des deux lignes dans l'intérieur du mica, correspondantes à ces lignes extérieures, faisait donc avec la ligne moyenne un angle de 22° $\frac{1}{2}$; et par conséquent l'angle des axes était seulement de 45°. Pour tenir compte de l'effet produit par le pouvoir réfringent de la plaque, on voit qu'il faut connaître l'indice de réfraction du cristal; et comme, dans les

(1) Soit n l'indice de réfraction relatif à l'émergence du rayon, qui dans la plaque était dirigé suivant l'un des axes; 2I, l'angle des axes à l'intérieur de la plaque, 2E l'angle apparent des mêmes axes, après la réfraction, on aura sin. $I = \frac{1}{n}$. sin. E. L'effet de la réfraction est, comme l'on voit, d'augmenter l'angle véritable.

substances biréfringentes, cet indice est variable, il serait à désirer que l'on connût sa valeur pour le cas particulier d'émergence, amené par l'expérience même. Mais comme en général les variations des indices de réfraction sont assez petites dans les cristaux connus, on pourra, par approximation, employer l'une quelconque des valeurs que l'observation aura fait connaître, ou mieux encore, prendre une moyenne entre l'indice maximum et l'indice minimum, si déjà l'on a observé dans la substance plusieurs cas différents de réfraction.

Indépendamment du phénomène des anneaux, on peut encore faire servir à la détermination des axes optiques, l'observation des teintes que la lumière polarisée développe dans les lames minces (1) des cristaux. Supposons que l'on ait une lame

(1) Les plaques cristallines biréfringentes, taillées perpendiculairement aux axes, ne sont pas les seules qui développent des couleurs dans la lumière polarisée. On peut, avec des lames parallèles ou obliques, obtenir des phénomènes de polarisation chromatique, soit en employant des lames isolées, suffisamment minces, soit en combinant, entre elles, deux plaques épaisses, de manière que leurs actions opposées sur la lumière se compensent en très-grande partie. La coloration des lames minces de gypse et de mica a été remarquée pour la première fois par Arago; elle est due à l'interférence des deux rayons réfractés qui suivent une même direction; ce n'est plus la lumière polarisée convergente qui donne naissance à ce phénomène, mais la lumière parallèle, et dans ce cas c'est une teinte uniforme que l'on aperçoit sur toute la lame, en la regardant avec un analyseur, au lieu d'anneaux ou de bandes colorées de teintes variables.

Si l'on présente à un rayon polarisé, une lame de cristal de roche légèrement prismatique, dont les faces soient parallèles à l'axe, on observe, en regardant d'un peu loin avec une lame de tourmaline, des bandes parallèles de couleurs très-vives. Une lame à faces parallèles à l'axe, et d'une épaisseur convenable, donne, non plus des bandes parallèles, mais quatre systèmes de bandes hyperboliques, quand on l'observe à la flamme de l'alcool salé (Observations de MM. Delezenne et Müller). Enfin, des lames de quarz, obliques à l'axe, produisent aussi par leur croisement des bandes colorées parallèles. Si l'on prend une pareille lame dont les faces soient bien parallèles, et qu'on la partage par le milieu, pour superposer ensuite les deux moitiés, en croisant les lignes de section, le système ainsi formé donnera, dans la pince aux tourmalines, des bandes colorées extrêmement vives. Ce même système, auquel on ajoute une seule tourmaline, compose un polariscope très-sensible, appelé *polariscope de Savart*, et qui sert à reconnaître les moindres traces de polarisation qui peuvent exister dans un faisceau de lumière.

Les phénomènes de la polarisation colorée ne servent pas seulement à constater les différences de structure que présentent les cristaux homogènes, chacun selon sa nature; ils font encore découvrir dans le même cristal les variations de structure ou de composition moléculaire qui se rencontrent dans certains échantillons ou dans certaines espèces, et qui, sans leur secours, auraient échappé à l'observation. Il y a un grand nombre de cas d'hémitropie, dans lesquels la diversité des teintes polarisées rend évidente la juxta-position des parties. Les cas

cristalline, taillée perpendiculairement au plan des axes, et assez mince pour produire des couleurs, quand on la place dans les appareils ordinaires de polarisation ; on exposera d'abord la lame au rayon polarisé sous l'incidence normale ; puis on cherchera, comme dans le premier mode d'expérience, les deux sections rectangulaires dans lesquelles toute lumière disparaît, et où la lame est sans action pour troubler la polarisation primitive. Cela fait, on mettra les sections à 45° du plan de polarisation, et l'on inclinera la lame à droite ou à gauche autour d'une des lignes de section. Il y en aura une qui sera perpendiculaire au plan des axes, et qui se distinguera par la propriété suivante. Lorsqu'on inclinera la lame autour de cette ligne, on verra sa teinte monter dans l'ordre des couleurs, jusqu'à ce que, pour une certaine inclinaison déterminée, elle arrive au noir ; au-delà de ce terme, les couleurs reparaissent, et d'un côté comme de l'autre, on obtient la même succession de teintes correspondantes. Cette inclinaison pour laquelle l'action propre de la lame s'évanouit, et qui est précédée et suivie du retour de teintes pareilles, annonce que le rayon polarisé passe alors par l'un des axes du cristal. La même inclinaison en sens contraire de la lame autour de la même ligne de section, déterminera pareillement la direction du second axe, et la rotation nécessaire pour passer de l'une de ces positions à l'autre, donnera, comme dans l'expérience des anneaux, l'angle compris entre les rayons émergents qui auront traversé le cristal dans la direction de ses axes (1).

de ce genre les plus intéressants sont ceux dans lesquels plusieurs parties se juxta-posent ou s'entre-croisent de manière à former un tout symétrique, une sorte de mosaïque régulière, dont les compartiments se distinguent par des teintes différentes de lumière polarisée. On voit de beaux exemples de ces structures composées, dans la variété d'apophyllite que M. Brewster a nommée *tessélite*, dans l'analcime, la topaze, le nitre, l'arragonite, etc.

(1) La principale difficulté que l'on rencontre dans la recherche des axes optiques, quand le cristal appartient aux systèmes à axes de cristallisation obliques, consiste dans la détermination préalable des sections principales ou des axes d'élasticité de la substance. On peut se servir pour cela de la pince aux tourmalines, dans laquelle on place la lame cristallisée, en la faisant tourner sur elle-même, jusqu'à ce qu'on obtienne l'obscurité, en regardant d'assez loin, pour que l'œil ne reçoive que de la lumière parallèle. Si l'on trouve une position qui donne l'obscurité complète, on en conclut que deux des axes d'élasticité du cristal correspondent alors aux axes optiques des tourmalines. On peut employer avec avantage pour ce genre de recherches, le nouveau polariscope construit par de Kobell et auquel ce minéralogiste a donné le nom de *Stauroscope* (Voyez *Gelehrte Anzeigen der Münchener Acad.* 1855, tome XL,

§ 15. *Du microscope polarisant d'Amici.*

Nous avons supposé jusqu'à présent que l'on se servait, dans l'étude des propriétés biréfringentes, de la pince aux tourmalines, ce qui exige l'emploi de lames cristallines d'une épaisseur et d'une largeur assez notables. Mais on peut substituer avec avantage à l'appareil de Biot le microscope polarisant d'Amici, qui permet de reconnaître la nature des propriétés optiques d'un minéral, sur des fragments excessivement minces et étroits, et d'étendre par là ce moyen de recherche à une foule de minéraux rares ou d'un faible degré de transparence.

Ce microscope est pourvu de deux parties extrêmes, dont l'une sert de polariseur, et l'autre d'analyseur, et entre lesquelles sont plusieurs systèmes de verres placés en ligne sur un même axe, et qui ont pour objet de modifier la convergence du faisceau vertical de lumière polarisée. Le premier, celui qui reçoit immédiatement ce faisceau, est un système lenticulaire destiné à éclairer fortement un point de la lame cristallisée que l'on place au-dessus, en faisant converger vers ce point la lumière polarisée. Le dernier est un véritable microscope, composé, comme tout appareil de ce genre, d'un objectif et d'un oculaire.

Ce microscope peut être monté avec deux pièces différentes, qui se substituent l'une à l'autre : l'une, pour observer les anneaux produits par la lumière polarisée convergente, qui se croise en un point de la lame; l'autre, pour observer les couleurs, qui se développent à la fois dans toute l'étendue de la lame, lorsqu'elle est traversée par un faisceau de lumière polarisée parallèle. Le dernier appareil sert à faire voir d'un seul coup-d'œil toutes les irrégularités de structure, ou toutes les variations de composition, qui se rencontrent assez fréquemment dans des lames cristallines, même d'une très-faible étendue, comme on le remarque dans le quarz, dans l'apophyllite, etc.

p. 146), parce que cet appareil est destiné à observer la croix noire d'une lame de spath calcaire taillée perpendiculairement à l'axe et combinée avec une lame cristalline quelconque d'un cristal à deux axes. On trouve, en opérant ainsi, que la croix noire du spath disparaît pour toutes les positions de la lame surajoutée, excepté celles où les sections principales de cette lame coïncident avec les axes des tourmalines. En recherchant avec soin ces positions exceptionnelles, on arrivera facilement à reconnaître la direction des axes d'élasticité.

On doit à M. Descloizeaux un grand nombre d'observations précieuses qu'il a faites avec cet instrument (1).

§ 16. *Cristaux à deux axes, positifs ou négatifs. — Détermination des élasticités principales, ou des trois constantes optiques a, b, c* (2).

Les cristaux biréfringents à deux axes ne se distinguent pas seulement entre eux par l'écartement plus ou moins grand des axes dans chaque espèce; ils offrent encore un genre de distinction analogue à celui que nous avons remarqué dans les cristaux à un axe, et qui se déduit du caractère particulier de leur ligne moyenne, c'est-à-dire de la ligne qui partage en deux parties égales l'angle aigu des deux axes. Les cristaux à deux axes sont *positifs*, quand l'axe de plus petite élasticité se confond avec la ligne moyenne; ils sont *négatifs* au contraire, quand c'est l'axe de plus grande élasticité qui coïncide avec cette ligne. Des plaques de ces deux sortes de cristaux, taillées perpendiculairement à la ligne moyenne, se comportent différemment dans les expériences relatives au développement des couleurs polarisées; elles agissent les unes dans un sens, les autres dans le sens opposé, comme le font les cristaux dits positifs et négatifs parmi ceux qui n'ont qu'un seul axe.

Pour déterminer le caractère optique des cristaux à deux axes, il faut chercher les valeurs des indices principaux de réfraction, qui correspondent aux trois axes d'élasticité; l'indice principal de réfraction, correspondant à un axe, est l'indice du rayon réfracté qui, dans la section perpendiculaire, suit la loi de Descartes : pour l'obtenir, on taille un prisme de la substance qui ait son arête dirigée parallèlement à l'axe que l'on considère : on fait tomber sur ce prisme un rayon qui soit dirigé, et en même temps polarisé, perpendiculairement à cette arête, et l'on détermine, par les méthodes ordinaires, l'indice de réfraction de ce rayon.

Soient a, b, c les trois demi-axes de la surface d'élasticité; les élasticités principales correspondantes seront proportionnelles à a^2, b^2 et c^2; et si l'on suppose $a>b>c$, à a répondra la plus

(1) Voir le Mémoire déjà cité, *Annales des Mines*, tome XI, p. 261.

(2) Ces trois constantes déterminent les demi-axes de la surface d'élasticité, et représentent en même temps les vitesses de propagation des ondes planes parallèlement à ces axes.

grande élasticité, et à c la plus petite. La théorie de la double réfraction fait voir que la vitesse de propagation des rayons qui sont dirigés et polarisés perpendiculairement à un des demi-axes a, b, c est égale à ce demi-axe ou à la racine carrée de l'élasticité principale correspondante. Si donc on pose

$$\frac{1}{a} = \alpha, \quad \frac{1}{b} = \beta, \quad \frac{1}{c} = \gamma,$$

α, β, γ seront les indices principaux de réfraction, et α sera l'indice *minimum*, γ l'indice *maximum*. Le cristal sera positif, si l'on trouve l'indice maximum dans la section perpendiculaire à la ligne moyenne; il sera négatif, si c'est l'indice minimum qu'on y observe. La détermination des trois indices principaux fera connaître les trois constantes a, b, c; et ces trois constantes à leur tour pourront donner le moyen de trouver par le calcul la valeur de l'angle des deux axes optiques : car, la théorie de Fresnel nous apprend encore que, si l'on représente par I l'angle des axes optiques, on a

$$\text{tang.}\frac{I}{2} = \pm\sqrt{\frac{b^2 - c^2}{a^2 - b^2}}.$$

La table suivante, que l'on doit en partie à M. Brewster, mais qui a été considérablement accrue ou modifiée par les recherches plus récentes de MM. Rudberg, de Sénarmont, Beer, Grailich, Descloizeaux, etc., fait connaître pour un grand nombre de cristaux naturels, l'inclinaison des axes optiques, et le caractère positif et négatif de leur double réfraction. Dans cette table 2E désigne l'angle apparent ou extérieur, tel qu'il est donné par l'observation immédiate ; 2I représente l'angle intérieur ou réel, obtenu du premier par réduction, ou déduit par le calcul de la formule précédente, après la détermination des constantes a, b, c.

TABLE

DES CRISTAUX A DEUX AXES.

NOMS des CRISTAUX.	ANGLE des AXES.	CARACTÈRE optique des cristaux.	NOMS des OBSERVATEURS.
Soufre.	2 I = 70 à 75°.	positif.	Descloizeaux.
Brookite.	pour les rayons rouges, 2E = 65°. pour les rayons verts, 2 E = 10°.	positif.	Grailich.
Borax.	2 E = 59°.	négatif.	De Sénarmont.
Nitre.	2 E = 9° 17'. 2 I = 6° 10'.	négatif.	Miller.
Arragonite.	2 E = 30° 50'. 2 I = 18° 12'.	négatif.	Heusser.
Carbonate de soude.	2 E = 70°.	négatif.	De Sénarmont.
Carbonate de strontiane. . .	2 E = 10° 30'.	négatif.	Grailich.
Carbonate de baryte. . . .	2 E = 20°.	négatif.	Grailich.
Carbonate de plomb. . . .	2 E = 16° 44'. 2 I = 8° 3'	négatif.	Descloizeaux.
Leadhillite.	2 E = 20°.	négatif.	Descloizeaux.
Sulfate de plomb.	2 I = 90°.	positif.	Brewster.
Sulfate de strontiane. . . .	2 E = 91°. 2 I = 50°.	positif.	Brewster.
Sulfate de baryte.	2 E = 59° 6'. 2 I = 35° 4'.	positif.	Heusser.
Sulfate de chaux anhydre. . .	2 E = 71° 31'. 2 I = 43° 32'.	positif.	Miller.
Gypse.	2 I = 57° 31'.	positif.	Angstrœm.
Sulfate de magnésie à 7 HO. .	2 E = 79° 2'. 2 I = 50° 52'.	négatif.	Miller.
Sulfate de zinc à 7 HO. . . .	2 E = 64° 18'. 2 I = 44° 2'.	négatif.	De Sénarmont.
Sulfate de cuivre.	2 I = 45°.	négatif.	Brewster.
Sulfate d'ammoniaque. . . .	2 I = 49° 42'.	positif.	Marx.
Sulfate de potasse.	2 I = 66° 54'.	positif.	De Sénarmont.
Thénardite.	2 I = 90°.	positif.	Descloizeaux.
Sel de Glauber.	2 E = 80° 26'.	négatif.	Miller.
Glaubérite.	2 I varie de 0° à 3°.	négatif.	Brewster.

NOMS des CRISTAUX.	ANGLE des AXES.	CARACTÈRE optique des cristaux.	NOMS des OBSERVATEURS.
Mésotype.	2 E = 90°.	positif.	Brewster.
Scolésite.	2 E = 60°.	négatif.	Descloizeaux.
Stilbite.	2 E = 61°.	négatif.	Descloizeaux.
Heulandite.	2 E = 54° 17′.	positif.	Heusser.
Comptonite.	2 I = 56°.	positif.	Brewster.
Brewstérite.	2 E = 85°.	positif.	Descloizeaux.
Thomsonite.	2 E = 79°.	positif.	Descloizeaux.
Harmotome.	2 E = 90°.	positif.	Descloizeaux.
Prehnite.	2 E = 120°.	positif.	Descloizeaux.
Axinite.	2 E = 107°.		
Péridot.	2 I = 87° 56′.	positif.	Descloizeaux.
Calamine.	2 E = 70°.	positif.	Grailich.
Talc.	2 I = 7° 24′.	négatif.	Brewster.
Clinochlore de Pensylvanie. .	2 E = 86°.	positif.	Blake.
Clinochlore de l'Oural. . . .	2 E = 50°.	positif.	Descloizeaux.
Pyrophyllite de l'Oural. . . .	2 E = 110°.	négatif.	Descloizeaux.
Micas.	2 I varie de 0° à 70°.	négatif.	Biot, de Senarmont, Grailich, etc.
Cordiérite de Bavière. . . .	2 E = 124° 24′. 2 I = 70°.	négatif.	Descloizeaux.
Staurotide.	2 I = 85°.	positif.	Beer.
Andalousite du Brésil. . . .	2 I = 87°.	positif.	Descloizeaux.
Disthène.	2 I = 81° 48′.	négatif.	Brewster et Descloizeaux.
Épidote.	2 I = 87° 5′.	positif.	Miller.
Pyroxène diopside.	2 E = 111° 28′. 2 I = 58° 57′.	positif.	Miller.
Feldspath orthose.	2 E = 122°.	négatif.	Heusser.
Feldspath albite.	2 E = 122°.	positif.	Descloizeaux.
Hopéite.	2 I = 48°.	négatif.	Brewster.
Struvite.	2 E = 59° 30′.	positif.	Descloizeaux.
Cymophane.	2 E = 50° 7′.	positif.	Soret.
Euclase.	2 E = 88°. 2 I = 49° 37′.	positif.	Descloizeaux.
Topazes.	2 I varie de 72° à 121°.	positif.	Brewster, Rudberg, etc.
Sphène.	2 I = 30° 22′.	positif.	Miller.
Scorodite.	2 E = 90°.	positif.	Descloizeaux.
Autunite (phosphate jaune d'urane).	2 E = 54°.	négatif.	Descloizeaux.
Euchroïte.	2 E varie de 60° à 70°.	positif.	Grailich et Lang.

§ 17. *Résumé des diverses propriétés biréfringentes.*

En résumant tout ce qui précède, on voit que l'on peut distinguer dans tous les corps biréfringents, trois sortes de directions ayant des caractères différents :

1° Des directions en nombre infini, qui constituent le cas le plus général, et pour lesquelles il y a toujours bifurcation de la lumière naturelle incidente, lorsqu'elle tombe normalement sur une face perpendiculaire à l'une d'elles. Un rayon polarisé quelconque ne saurait se propager le long de ces directions : chacune d'elles ne peut être parcourue que par *deux* rayons polarisés seulement, de *vitesses différentes*, dont les plans de polarisation sont déterminés et à angles droits.

2° Des directions particulières, beaucoup moins nombreuses que les précédentes, et le plus souvent réduites à trois seulement, pour lesquelles il n'y a point bifurcation de la lumière incidente, en supposant que cette lumière soit un large faisceau parti de points très-éloignés, et qu'elle tombe normalement sur une face qui soit perpendiculaire à l'une d'elles. Mais cette lumière n'en est pas moins décomposée par l'action du milieu cristallin, en *deux* faisceaux distincts, polarisés en sens contraires, qui suivent, il est vrai, la même route dans le cristal, mais avec des *vitesses différentes*, et qui se séparent à l'émergence, lorsqu'elle a lieu par une face oblique à la face d'entrée. Ces directions remarquables, qui donnent des images simples à travers deux faces qui leur sont perpendiculaires, et seulement dans ce cas, constituent une espèce d'axes, auxquels les physiciens ont donné le nom d'*axes d'élasticité.*

3° Des directions particulières, bien plus remarquables encore, qui se réduisent à une ou deux seulement, et se distinguent des précédentes, en ce que la différence des vitesses est *nulle* pour tous les larges faisceaux qui les parcourent, en même temps qu'elles admettent les ondes planes qui sont polarisées dans un sens quelconque, et non pas uniquement celles qui sont polarisées dans deux sens déterminés. Ces directions sont les *axes optiques* proprement dits, ou *axes de double réfraction* des physiciens et des minéralogistes. Selon qu'il en existe deux, ou un seul, on distingue les cristaux biréfringents en cristaux *à deux axes*, et cristaux *à un axe*. Dans le premier cas, il y a toujours bifurcation du rayon incident, lorsqu'il s'agit d'un rayon

isolé, émané d'un point très-voisin, et qui pénètre normalement par une face perpendiculaire à l'un des deux axes ; et par conséquent, en visant à un pareil point, on ne peut pas avoir d'image qui soit réellement simple, si l'on regarde à travers deux faces inclinées, dont une (celle tournée du côté de l'œil) est perpendiculaire à un axe optique. Ces deux axes optiques ne sont donc des axes de double réfraction que relativement aux larges faisceaux de lumière ou aux ondes lumineuses planes. Ils n'en sont pas pour les simples rayons, émanés d'un point très-rapproché. Dans le second cas, tout rayon incident normal, qui entre par une face perpendiculaire à l'axe unique, pénètre sans se diviser ; par conséquent, dans ce cas, on a toujours des images simples des objets que l'on regarde à travers des faces inclinées. Cette propriété de donner des images simples n'est donc pas un caractère absolu sur lequel on puisse s'appuyer, pour définir et reconnaître les axes de double réfraction ; mais nous trouvons un caractère de ce genre dans le phénomène des anneaux colorés concentriques, coupés par des lignes ou des croix obscures, et qui se développent lorsqu'on place dans l'appareil aux tourmalines des lames cristallines, taillées perpendiculairement à un axe, et qu'on regarde en approchant l'œil très-près de l'appareil, de façon qu'il ne puisse recevoir que de la lumière polarisée convergente. Ce phénomène de coloration résulte en effet de la propriété réellement caractéristique des axes, savoir : que la différence des vitesses de propagation est nulle pour les rayons diversement polarisés, qui les parcourent ; la différence des vitesses des rayons de même direction étant à son minimum dans l'axe, elle doit être *très-petite* pour toutes les lignes obliques qui s'écartent peu de l'axe ; et, par conséquent, dans le voisinage d'un axe optique, les deux rayons polarisés qui suivent une même route, sont dans une condition favorable à leur interférence, et au développement de teintes particulières, variables avec l'obliquité des rayons émergents. De là, l'origine de ces anneaux qui entourent les axes.

Dans le groupe des cristaux à deux axes optiques, il existe une quatrième sorte de lignes ou de directions douées de propriétés particulières : ce sont deux axes optiques secondaires, véritables axes de double réfraction pour les rayons isolés, et qui, de plus, peuvent donner lieu à une réfraction conique extérieure, comme les axes optiques principaux en produisent une au-dedans du cristal. Ces cas singuliers de réfraction conique

ne se rencontrant que dans les cristaux à deux axes, ajoutent un trait de plus à ceux qui déjà caractérisent si nettement ce groupe de corps.

Le tableau suivant retrace les principaux faits relatifs à la réfraction de la lumière par les cristaux, en même temps qu'il indique les rapports existants entre les variations de ces phénomènes et les changements de système cristallin.

	CARACTÈRES DISTINCTIFS.		SYSTÈMES CRISTALLINS.
CRISTAUX UNIRÉFRINGENTS ne donnant lieu à aucune distinction d'axes.	Sans axes optiques.	Un seul rayon réfracté. Indice de réfraction constant.	à trois axes de symétrie, égaux et rectangulaires : (système cubique).
CRISTAUX BIRÉFRINGENTS à deux sortes d'axes : 1° *Axes d'élasticité*, ou lignes pour lesquelles la séparation des deux faisceaux réfractés est nulle, mais non la différence de leurs vitesses. 2° *Axes optiques*, ou directions dans lesquelles la différence des vitesses est nulle pour toutes les ondes planes qui les suivent, quel que soit le sens de leur polarisation.	A un axe optique. Une infinité d'axes d'élasticité, dont un perpendiculaire à tous les autres. Une infinité de sections principales. Une seule section perpendiculaire.	Deux rayons réfractés polarisés à angles droits, un ordinaire et un extraordinaire. Images simples dans la direction de l'axe optique, même à travers des faces inclinées. Symétrie parfaite des phénomènes tout autour de l'axe. Anneaux colorés circulaires, coupés par une croix noire. Cristaux positifs ou négatifs.	A un axe principal de symétrie : (Systèmes rhomboédrique et quadratique).
	A deux axes optiques. Trois axes d'élasticité rectangulaires. Une section principale. Deux sections perpendiculaires.	Deux rayons réfractés, polarisés à angles droits, et tous deux extraordinaires. Plus d'images réellement simples, d'un point de mire rapproché, à travers des faces inclinées. Plus de symétrie des phénomènes autour de chaque axe. Anneaux ovales, coupés par une ligne noire. Cas particuliers de réfraction conique. Valeur particulière de l'angle des axes. Cristaux positifs ou négatifs.	A trois axes inégaux de symétrie : (les trois derniers systèmes prismatiques).

§ 18. *De la polarisation circulaire.*

Il existe un phénomène remarquable, qu'on a découvert pour la première fois dans le quarz, et qu'on a regardé pendant longtemps comme propre à cette seule espèce minérale, phénomène qui dépend d'une action polarisante, particulière, que ses cristaux exercent dans la direction de leur axe. Par suite de cette action, dont l'énergie n'est pas la même pour les rayons de diverses couleurs, un rayon polarisé de lumière blanche, dont toutes les parties étaient polarisées dans un même plan, avant son entrée dans le cristal, est modifié dans son passage et changé en un rayon polarisé circulairement. Chacun des rayons simples, de réfrangibilité diverse, qui le composent, a éprouvé dans son plan de polarisation une rotation ou déviation angulaire, qui varie de l'un à l'autre, et pour le même rayon est proportionnelle à l'épaisseur de la plaque. Examiné à l'émergence, ce nouveau rayon a tous les points de son contour semblables entre eux, comme un rayon de lumière naturelle : cependant il en diffère, en ce que, si on l'analyse avec un spath biréfringent, il se divise toujours en deux faisceaux d'égale intensité, et colorés de teintes complémentaires. Si c'est un rayon polarisé de lumière homogène, qui a traversé le cristal dans la direction de son axe, à sa sortie il redevient un rayon polarisé ordinaire; mais son plan de polarisation a tourné dans un certain sens; et, ce qui est fort remarquable, c'est que certaines plaques de quarz le font tourner de droite à gauche (et, pour cela, on les dit *lévogyres*), tandis que d'autres le font tourner de gauche à droite (ou sont *dextrogyres*).

Ce phénomène doit avoir pour cause une constitution particulière, soit du milieu cristallisé, soit de sa propre molécule, d'après laquelle il y aurait autour de l'axe une différence physique entre le sens de droite à gauche et celui de gauche à droite. C'est dans le groupe atomique, qui constitue la molécule du quarz, qu'il faut placer, selon nous, cette disposition rotatoire; car, on a vu, p. 142, que le quarz est une espèce rhomboédrique, dont les cristaux, déjà hémiédriques, ont subi dans leur forme une seconde espèce d'hémiédrie, du genre de celle que nous avons nommée *rotatoire oblique;* cette hémiédrie, qui manifeste son action extérieure sur les scalénoèdres, les partage en deux formes conjuguées, non superposables, qui sont des trapézoè-

s ou plagièdres trigonaux, l'un droit et l'autre gauche. Les es de ces plagièdres se montrent fréquemment, à l'état ruentaire, sur les angles solides latéraux, et l'on se rappelle dans certains cristaux de quarz, ces facettes sont tournées s un sens, tandis que dans d'autres cristaux elles sont tours en sens contraire.

M. John Herschell a signalé le premier l'accord presque cont, qui existe entre le sens de la polarisation circulaire ou du uvement des plans de polarisation, et celui dans lequel s'inent les facettes de la variété plagièdre, ce qui permet de déminer d'avance, à l'inspection de la forme, dans quel sens a lieu la rotation de la lumière (1).

On voit qu'il y a ici, comme dans les cas d'électricité polaire t nous aurons bientôt occasion de parler, deux phénomènes siques corrélatifs, l'hémiédrie rotatoire, et la polarisation itoire ou circulaire; et ces deux phénomènes concomitants sont pas la cause l'un de l'autre, mais ils sont tous deux la séquence d'un autre fait primordial, savoir: la forme disétrique de la molécule cristalline du quarz, que nous avons milée, p. 144, à celle d'une molécule rhomboédrique qui ait été tordue dans un sens ou dans l'autre.

Le quarz, en même temps qu'il possède la singulière propriété t nous parlons, jouit encore des propriétés biréfringentes inaires: mais il a besoin d'être en lame extrêmement mince, lée perpendiculairement à l'axe, pour laisser voir une ombre croix bleuâtre, au milieu d'un système d'anneaux circues; lorsque l'épaisseur de la lame augmente, la croix dispa: complètement du centre des anneaux, et l'on n'aperçoit de faibles traces de ses branches au travers des courbes coées; les branches de la croix ne se prolongeant plus dans la ge centrale, celle-ci offre alors une teinte uniforme qui passe cessivement par toutes les couleurs du prisme, si l'on fait rner dans le même sens la tourmaline ou le prisme de Nicol sert d'analyseur. Cette variation de couleurs s'explique par

(1) Il paraît résulter de cette généralité, que, selon la nature particulière des vidus de l'espèce quarz, les facettes trapéziennes ont plus de tendance à se luire dans une direction que dans une autre. Mais rien ne s'oppose absoment à ce que, dans le même cristal, on puisse trouver des facettes disposées étriquement en sens contraires. Les facettes de droite et de gauche ne luent pas les unes les autres; elles ne sont qu'indépendantes : elles peu: exister séparément ou ensemble; et, lorsque ce dernier cas a lieu, elles en réalité distinctes par des propriétés physiques différentes.

cette circonstance que, dans la lumière qui a traversé la lame de quarz, les plans de polarisation des rayons de diverse réfrangibilité ont été déviés inégalement, en sorte que pour pouvoir éteindre successivement ces rayons, la section principale de tourmaline analysante doit tourner elle-même d'une quantité qui corresponde à la déviation de leurs plans.

Cette curieuse expérience peut servir à reconnaître si la lame de quarz est dextrogyre ou lévogyre. Elle est dextrogyre, c'est-à-dire fait tourner vers la droite les plans de polarisation des rayons qui la traversent dans la direction de son axe, si, lorsqu'on tourne l'analyseur de gauche à droite, comme on tourne un tire-bouchon pour l'enfoncer dans le liége, on obtient la succession des couleurs du prisme dans l'ordre direct, en passant par le rouge pour aller au violet; la lame est lévogyre, si, en opérant de la même manière, on trouve que les couleurs se succèdent dans l'ordre inverse, en allant du violet vers le rouge. Nous ajouterons que, si la lame de quarz tourne à droite, en faisant tourner la tourmaline voisine de l'œil dans le même sens, on voit naître successivement au milieu de la plage des taches colorées, qui se tranforment en anneaux et grandissent en s'éloignant du centre (anneaux centrifuges): tandis que, si le quarz est lévogyre, en tournant toujours à droite la tourmaline, on verra les anneaux colorés se contracter de plus en plus, en diminuant de diamètre, et aller successivement se fondre en une tache centrale (anneaux centripètes).

Si l'on superpose deux plaques de quarz, d'épaisseurs inégales et de rotations contraires, elles produiront sur la lumière des actions opposées, qui se compenseront en partie, de manière que le système des deux plaques produira le même effet qu'on obtiendrait avec une seule plaque, semblable à la plus épaisse, et dont l'épaisseur serait juste la différence entre celles des deux plaques. De là, il résulte que, si l'on superpose deux plaques de propriétés opposées, mais d'égale épaisseur, ces plaques tendront à neutraliser complètement leurs effets : aussi remarque-t-on que, dans ce cas, la croix noire reparaît au centre des anneaux. Cependant, les effets ne sont pas entièrement détruits, en ce sens que les anneaux colorés manifestent des traces de dislocation, et que les branches de la croix se contournent en spirales, en prenant la forme de deux S croisées. Ce curieux phénomène est connu sous le nom des *spirales d'Airy*. Le sens de l'enroulement est déterminé par la nature de la plaque, qui reçoit la première le faisceau polarisé. Si cette plaque, la plus éloignée

de l'œil au moment de l'expérience, est dextrogyre, les branches de la croix s'enroulent de gauche à droite; si la plaque est lévogyre, l'enroulement a lieu vers la gauche.

Nous avons vu, à l'article des groupements, que des cristaux de quarz, droits et gauches, ou des lames cristallines de structures inverses, et, par conséquent, de rotations contraires, peuvent se trouver accolés ou superposés, avec la condition d'offrir extérieurement l'apparence d'un cristal simple, de la forme qui est ordinaire dans l'espèce. Aussi existe-t-il dans la nature des cristaux de quarz, qui, taillés perpendiculairement à l'axe, offrent des plages, les unes à rotation vers la droite, les autres à rotation vers la gauche, séparées les unes des autres par des lignes neutres. Il existe même des plaques qui n'offrent qu'un pouvoir rotatoire absolument nul, et qu'on peut considérer comme résultant de la superposition de couches très-minces, alternativement dextrogyres ou lévogyres. M. Brewster a depuis longtemps signalé dans les quarz violets ou améthystes, cette circonstance remarquable des deux sortes de quarz, cristallisées ensemble en couches alternatives, qui forment une succession d'enveloppes polyédriques, parallèles entre elles et disposées autour d'un même axe. On distingue souvent les couches sur les surfaces de cassure, où elles se dépassent mutuellement, et y produisent ces ondulations singulières, qui servent à distinguer cette variété du quarz ordinaire. Lorsqu'une plaque d'améthyste, taillée perpendiculairement à l'axe, est éclairée par la lumière polarisée, elle présente une apparence de raies ou de franges, diversement nuancées, suivant le plan de polarisation des rayons qui émergent de chaque point. Les couches successives offrent un contraste des plus frappants par les bandes de couleurs vives, qui alternent avec des bandes obscures. On rencontre aussi très-souvent des cristaux de quarz, dans lesquels des accidents de cristallisation troublent la régularité des apparences que nous avons décrites. On peut consulter, dans les *Mémoires de la Société de Lille*, pour 1834 et 1835, plusieurs travaux de M. Delezenne, qui renferment beaucoup d'observations curieuses sur les phénomènes dont il s'agit.

Le quarz-hyalin a été pendant longtemps la seule substance minérale, qui, à l'état cristallisé, se fût montrée pourvue du pouvoir rotatoire dont il vient d'être question. Nous avons dit (p. 94) que M. Marbach avait retrouvé cette même propriété dans des cristaux artificiels de chlorate de soude, appartenant

au système régulier, et que là, comme dans le quarz, elle était liée à une tétartoédrie, produisant des formes inversement semblables et non superposables. On connaît maintenant une seconde substance minérale, le cinabre ou sulfure de mercure, se rapportant, ainsi que le quarz, au système rhomboédrique, et qui est douée comme lui du pouvoir rotatoire à un degré même beaucoup plus marqué, puisque le pouvoir du cinabre est égal à quinze ou seize fois celui du quarz. Cette observation intéressante est due à M. Descloizeaux, qui a reconnu le fait en examinant des lames très-minces de la substance au microscope polarisant d'Amici. Jusqu'à présent, aucune des formes cristallines de cette espèce n'a offert de facettes, indiquant une hémiédrie rotatoire en rapport avec la propriété dont il s'agit. Mais ce n'est là qu'un fait négatif, dont on ne peut rien préjuger contre les observations à venir, et surtout contre l'existence d'une structure intérieure dissymétrique ; les petites facettes latérales, qui pourraient traduire extérieurement ce genre de structure, étant chose purement contingente, et non pas nécessaire comme quelques personnes sont tentées de le croire.

Les divers genres d'hémiédrie, qui produisent des modifications profondes ou, comme on dit ordinairement, des dissymétries dans la forme des cristaux, ayant leur cause première dans la forme même et dans la structure atomique des molécules, ou tout au moins dans la composition et dans l'arrangement moléculaire de la masse, il arrive souvent que des propriétés physiques particulières accompagnent ces modes d'hémiédrie, et peuvent servir à les reconnaître et à les différencier entre eux. Nous verrons bientôt que, dans les minéraux cristallisés, l'hémiédrie polaire engendre ordinairement la pyro-électricité polaire. Dans le quarz, la polarisation rotatoire est en connexion manifeste avec l'hémiédrie de même nom ; et il était naturel de poser en principe, que ces deux phénomènes devaient généralement s'accompagner l'un l'autre, puisqu'ils ont tous deux une même cause, savoir : une structure ou un arrangement moléculaire dissymétrique.

Dans mes *Recherches sur la Cristallisation*, présentées à l'Institut en 1840, j'avais indiqué cette généralisation du fait que le quarz seul avait offert jusque-là; et, sachant que, parmi les minéraux connus, l'apatite et la schéelite présentaient, comme cette dernière espèce, une hémiédrie rotatoire autour d'un axe principal, j'avais été conduit à examiner si elles ne posséderaient

s en même temps la propriété optique correspondante. J'ai
nc fait tailler des plaques de ces minéraux dans le but d'y
chercher cette propriété, et je n'ai pu en découvrir la moindre
ice. Mais il faut observer ici, que les lames dont je me suis
vi étaient fort minces, et que cette expérience négative ne
ouve pas que les cristaux étudiés soient dépourvus de l'espèce
structure dont il s'agit, mais seulement que, dans les condi-
ns où l'on a opéré, cette structure n'exerce pas sur l'éther une
luence assez marquée pour pouvoir modifier sa constitution,
mme le fait le quarz. Il sera bon de renouveler des essais de
genre, sur ces minéraux ou d'autres qui pourraient se trouver
ns le même cas, à cause de l'intérêt tout particulier qu'offri-
t en eux la découverte de la polarisation circulaire.

En effet, tandis que dans le quarz l'hémiédrie rotatoire est
lique, elle est horizontale dans les deux minéraux que j'ai ci-
, de manière qu'elle produit le même résultat sur les moitiés
périeure et inférieure des cristaux, ce qui fait que tout reste
métrique de part et d'autre de la section transverse. Il suit
là, que si une lame d'apatite, taillée perpendiculairement à
xe, était douée, comme je le suppose, du pouvoir rotatoire,
si ce pouvoir ne s'y trouvait considérablement affaibli par la
ible réfraction et par la trop faible épaisseur sous laquelle on
observe, s'il pouvait y devenir efficace, cette lame offrirait
réunion des deux pouvoirs rotatoires contraires, comme je
i dit dans le mémoire mentionné ci-dessus : elle offrirait,
une manière permanente, la curieuse propriété que, dans la
lle expérience de Faraday, le verre n'acquiert que passagère-
ent sous l'influence d'un aimant électrique. La *même* lame,
effet, ferait tourner la lumière polarisée dans un sens, quand
e la recevrait sur une de ses faces, et, dans le sens contraire,
and la lumière entrerait par l'autre. Les deux pouvoirs rota-
res seraient donc réunis dans le même individu, tandis que
ur le quarz ils se montrent toujours séparés dans des indivi-
s différents.

Les substances solides et cristallisées ne sont pas les seules
l'on ait observé la polarisation circulaire. MM. Biot et See-
ck ont découvert cette propriété dans divers liquides, mais
s y existe généralement à un degré beaucoup plus faible que
ns le quarz. Là, où les molécules n'ont point d'aggrégation fixe,
est bien évident que le phénomène est produit par ces molé-
es mêmes, en vertu de leur forme ou de leur nature propre.

M. Pasteur, qui a étudié la polarisation circulaire dans un grand nombre de dissolutions salines, a constaté qu'elle y était toujours en relation avec l'hémiédrie rotatoire, en ce sens que, si l'on vient à faire cristalliser le sel dissous, ses formes seront hémièdres à droite ou hémièdres à gauche, selon que la dissolution a fait tourner le plan de polarisation de la lumière à droite ou à gauche.

On se rappelle qu'il existe deux modes différents d'hémiédrie rotatoire, que nous avons nommés l'un l'hémiédrie rotatoire horizontale, et l'autre l'hémiédrie rotatoire oblique. Le premier engendre des formes conjuguées, qui deviennent superposables par le simple retournement de l'une d'elles; et le second engendre des formes conjuguées, qui ne sont superposables par aucun changement de position. M. Pasteur a reconnu que, dans les dissolutions salines, le pouvoir rotatoire est toujours lié à la seconde espèce d'hémiédrie, celle qui produit des formes non superposables; et il ne peut pas en être autrement, lorsqu'il s'agit des liquides. Car, supposons que les molécules dissoutes appartiennent à l'hémiédrie horizontale, celle qui mène à des formes superposables, dans ce cas le sens de l'action moléculaire changera par l'effet seul du renversement de la molécule; et alors, à cause du nombre presque infini de ces molécules, elles se trouveront disposées en nombres égaux, une moitié dans un sens, et l'autre en sens contraire; et les deux genres d'action s'annuleront en se compensant mutuellement. La condition de l'hémiédrie rotatoire oblique, à formes non superposables, est donc nécessaire, dans le cas des dissolutions salines; elle ne l'est plus dans le cas des substances cristallisées, à structure simple et homogène, où les molécules peuvent être ramenées toutes ensemble au parallélisme par la cristallisation, et doivent alors agir toutes dans le même sens.

Jusqu'à l'année dernière, on ne connaissait pas de substance capable de dévier le plan de polarisation de la lumière à l'état de dissolution dans l'eau, et en même temps à l'état de cristaux. Tous les sels observés par MM. Biot et Pasteur, qui sont actifs, quand on les a dissous, n'agissent plus, quand ils reprennent l'état cristallin, bien que leurs molécules en cristallisant aient dû conserver leur dissymétrie, sans quoi l'hémiédrie de la forme serait un effet sans cause. M. Descloizeaux vient de constater la coexistence des deux actions dans le sulfate de strychnine, dont les cristaux appartiennent au système quadratique. Mais jusqu'à

sent il n'a pu découvrir dans ces cristaux aucune espèce de ettes hémiédriques.

9. *De l'absorption inégale de la lumière polarisée dans les cristaux biréfringents. — Polychroïsme. — Pléochroïsme.*

On se rappelle que la tourmaline, substance biréfringente à axe, exerce une absorption très-inégale sur les deux rayons larisés en sens contraire, qui la traversent dans toutes les di- tions perpendiculaires à l'axe; elle éteint beaucoup plus vite rayon ordinaire, et de là vient la propriété qu'elle a, quand épaisseur dépasse une certaine limite, de polariser complè- nent toute la lumière émergente dans un seul plan, savoir le n normal à son axe. C'est là un fait général, que l'on peut ndre d'abord à toutes les substances biréfringentes à un axe; ns toutes ces substances, comme dans la tourmaline, l'absorp- n du rayon ordinaire est la même pour toutes les directions; is celle du rayon extraordinaire varie progressivement avec clinaison du rayon sur l'axe, et elle est à son degré le plus ble dans la direction perpendiculaire. M. Babinet a donné, mme une loi qui souffre peu d'exceptions, que dans les cris- x uni-axes positifs, c'est le rayon extraordinaire qui est le plus tement absorbé, tandis que dans les cristaux négatifs, c'est le yon ordinaire.

Ces différences d'action deviennent surtout sensibles dans les staux biréfringents, qui sont à la fois transparents et colorés; lépendamment de la propriété qu'ils ont de polariser la lu- ère, comme le fait la tourmaline, perpendiculairement à leur , ces cristaux présentent encore un autre phénomène qui vient de la même cause : c'est le phénomène du dichroïsme, ns les cristaux à un axe optique, et celui du polychroïsme dans cristaux à deux axes. Sous ces dénominations on doit enten- la propriété qu'ont certains cristaux biréfringents, de mani- ter des couleurs diverses, quand on les regarde à l'œil nu par nsparence dans des sens différents. Cette propriété a été re- rquée d'abord dans les cristaux de cordiérite, qui se mon- nt d'un beau bleu dans un certain sens, et de couleur grise ns un autre sens perpendiculaire au premier; et c'est pour a que M. Cordier, à qui l'on doit la première détermination ce minéral, lui avait donné le nom de *dichroïte*, que Haüy a devoir changer en celui de cordiérite, le premier nom ne

rappelant point une propriété distinctive, puisqu'on la connaît aujourd'hui dans un grand nombre d'autres espèces.

Il importe de remarquer ici que le véritable polychroïsme consiste uniquement en une diversité de couleurs, qui sont toutes également produites par la lumière transmise à travers des cristaux biréfringents, et modifiée par cette transmission même, qui la partage en deux rayons polarisés, sur lesquels s'exercent des absorptions inégales. Gardons-nous de confondre ce phénomène particulier de couleurs multiples, avec un autre phénomène assez commun de double couleur, qu'on observe dans des corps à réfraction simple, tantôt amorphes, tantôt cristallisés. Par exemple, certains cristaux cubiques de fluorine d'Angleterre sont d'un beau vert, quand on les voit par réflexion, et d'un bleu intense, quand on les regarde par transparence. Cette fluorine bicolore n'est pas une substance dichroïte ou dichromatique : car, l'une des couleurs seulement est vue par transparence et appartient à la masse, tandis que l'autre n'est que la couleur de la surface. Sans doute ces couleurs sont encore dues, comme toutes les couleurs en général, à une absorption opérée par le cristal, sur telle ou telle partie de la lumière incidente : mais cette absorption n'est pas polarisante, et si elle s'exerce de préférence sur une certaine couleur, elle porte également sur tous les rayons de cette couleur, quel que soit leur sens de polarisation, ce qui fait que cette couleur après l'absorption est encore de la lumière naturelle, si elle l'était auparavant. Tel n'est pas le cas du véritable dichroïsme : outre que toutes les couleurs sont dues ici à la lumière transmise, l'absorption qui les produit s'exerce sur de la lumière polarisée et le fait inégalement sur les deux faisceaux de la même couleur qui sont polarisés en sens contraires. Dans le premier cas, la couleur transmise diffère de la couleur réfléchie, mais elle est la même quand on la regarde dans une direction quelconque. Dans le cas du vrai dichroïsme, la couleur transmise change de teinte ou de nuance, pour les directions qui sont inégalement inclinées sur l'axe.

Revenons au polychroïsme proprement dit, toujours lié à la double réfraction, et d'abord considérons-le dans les substances biréfringentes à un seul axe. Si l'on suppose une de ces substances taillée perpendiculairement à l'axe, et que l'on regarde la base dans une direction normale, on ne recevra dans l'œil que de la lumière naturelle, et l'on apercevra une certaine teinte, que l'on peut appeler la couleur de la base. Si la substance est

llée parallèlement à l'axe, la couleur transmise se composera ı rayon ordinaire et du rayon extraordinaire, et elle pourra ésenter une teinte très-différente de la première. Le rayon ornaire, s'il existait seul, reproduirait la couleur de la base; le yon extraordinaire seul donnerait une autre couleur, qu'on ut appeler la couleur de l'axe. En analysant la lumière émernte au moyen d'une tourmaline ou d'un prisme de Nicol connablement tourné, on pourra voir successivement l'une ou utre couleur, en regardant toujours perpendiculairement à ıxe. On pourrait les voir toutes les deux à la fois, si l'on se serit, pour analyser la couleur complexe que l'on voit à l'œil nu, un spath d'Islande à deux images, ou de la loupe dichroscoque dont nous parlerons dans un instant.

Si, au lieu de se borner à examiner le cristal dans les deux rections que nous avons indiquées, on le regardait dans une rection intermédiaire entre ces deux directions extrêmes, on ırait encore une couleur composée, passant par des nuances finies de celle qu'on voit dans le sens de l'axe à celle qu'on ›erçoit dans le sens perpendiculaire; en sorte que, comme l'a ès-bien remarqué M. Babinet, on a réellement ici une variaon de teintes ou de nuances à l'infini, et par conséquent un vétable polychroïsme, à parler en toute rigueur. Mais, on se connte ordinairement d'indiquer les deux couleurs que l'on voit, l'œil nu, dans les directions parallèle et perpendiculaire à l'axe, , quand ces deux couleurs sont bien tranchées, on dit que la ıbstance possède le *dichroïsme*. Tels sont, par exemple, parmi s espèces rhomboédriques, la tourmaline, la pennine, la chlote du Zillerthal, le mica du Vésuve, le corindon saphir, etc.; parmi les espèces quadratiques, le zircon, l'idocrase et l'apoıyllite de Poonah.

Les cristaux biréfringents à deux axes offrent souvent un exeme de ce qu'on peut appeler le *trichroïsme*. Plusieurs, en effet, issent voir à l'œil nu des couleurs différentes, quand on les reırde successivement dans trois directions perpendiculaires en- ≥ elles, et concordantes avec celles des axes d'élasticité. La corérite a passé pendant quelque temps pour une espèce rhomédrique et en même temps dichroïte: mais on a reconnu que ı cristaux appartiennent au système orthorhombique et qu'elle t douée du trichroïsme. Dans un sens, elle est d'un beau bleu; ıns un autre, d'un gris bleuâtre; dans la troisième direction, un gris tirant sur le jaune. Outre la cordiérite, nous citerons

encore, dans le même système cristallin, l'andalousite verte du Brésil, la topaze du Brésil et le diaspore de Schemnitz; parmi les espèces klinorhombiques, le pyroxène diopside, l'euclase, et parmi celles du dernier système, l'axinite.

On a vu, par ce qui précède, que les couleurs transmises par les cristaux biréfringents colorés, et que l'on perçoit à l'œil nu, sont en général des couleurs composées, qui résultent du mélange de deux couleurs propres, apportées l'une par les rayons ordinaires et l'autre par les rayons extraordinaires. Les deux teintes composantes se laissent voir séparément, lorsqu'on analyse la couleur complexe à l'aide d'un prisme de spath biréfringent, dont la section principale est convenablement tournée. M. Haidinger a imaginé, pour ce genre d'observation, bien préférable à l'examen qu'on peut faire à l'œil nu, un petit appareil qui se compose essentiellement d'un spath d'Islande, de forme rhomboïdale allongée, et d'une loupe ou lentille faiblement grossissante : c'est ce qu'il appelle la *loupe dichroscopique*, ou le *dichroscope*. En regardant, à l'aide de cet appareil, une lame d'un cristal possédant la propriété dont il s'agit, on voit dans une même direction deux couleurs, au lieu d'une teinte unique. Ce petit instrument permet donc d'étudier plus complètement qu'on ne l'avait fait jusqu'ici, le phénomène des couleurs polarisées, transmises par les cristaux biréfringents. Et parce que le fait essentiel que l'on découvre ainsi, est l'existence de plus d'une couleur dans une même direction, M. Haidinger a cru devoir désigner le phénomène considéré sous ce rapport, par un nouveau nom, qu'il substitue à l'ancien, celui de *pléochroïsme*. En se servant de cette loupe à double image, on a encore l'avantage de reconnaître le dichroïsme, dans les substances à un axe, en regardant dans une seule direction, et de voir à la fois les deux couleurs caractéristiques, placées l'une à côté de l'autre, ce qui permet de mieux saisir le contraste de leurs nuances (1).

Pour construire le dichroscope, on prend un morceau de spath d'Islande, donné par le clivage, et ayant la forme d'un prisme rhomboïdal allongé : on le couche horizontalement dans le sens de sa longueur, et sur les deux petites faces obliques qui le terminent, on colle des prismes de verre de 18°. A l'un des prismes on ajoute extérieurement un diaphragme percé d'une petite

(1) Le dichroscope peut encore servir à montrer les houppes colorées de polarisation dont il a été question page 356, et à l'aide desquelles on reconnaît directement le sens de polarisation de chaque image.

ouverture de forme rectangulaire pour le passage de la lumière, et sur l'autre on applique une lentille, qui fait voir deux images de l'ouverture, fort nettes et complètement séparées. En plaçant la lame du cristal, de manière que l'ouverture ne soit éclairée que par la lumière qu'elle a transmise, on verra dans le champ de la loupe deux images de cette ouverture, généralement formées par un mélange des rayons ordinaires et extraordinaires, sortis de la lame; et, pour deux positions relatives des sections principales de cette lame et du dichroscope, ce mélange disparaîtra : les deux couleurs primitives se montreront séparées, parce que l'une des espèces de rayons s'évanouira dans la première image, et l'autre dans la seconde.

1° *Cristaux à un axe.*

Si l'on appelle A la couleur de la face perpendiculaire à l'axe, et B celle des pans, et si d'abord on dirige le dichroscope perpendiculairement à la base, pour recevoir la lumière qui a traversé le cristal dans la direction de son axe, cette lumière qui est à l'état naturel se trouvera divisée par le spath et donnera deux images de l'ouverture, d'égale intensité, l'une ordinaire, de la couleur propre de la base, l'autre extraordinaire, de la couleur propre de l'axe. Si l'on place la lame du cristal de manière que son axe soit vertical, la couleur B des pans sera décomposée en deux nuances différentes, dont l'une, formée par les rayons ordinaires, sera de la couleur de la base, et dont l'autre, formée par les rayons extraordinaires, sera de la couleur de l'axe. L'image ordinaire se montre dans la partie supérieure du dichroscope, et l'image extraordinaire dans la partie inférieure. Voici une table qui contient quelques-unes des observations faites par M. Haidinger, sur des variétés colorées d'espèces dichromatiques, appartenant aux systèmes rhomboédrique et quadratique.

	O. Couleur de la base ou de l'image ordinaire.	E. Couleur de l'axe ou de l'image extraordinaire.
Apatite de Schlaggenwald.	vert de montagne.	bleu de cane.
Carbonate de manganèse. .	rouge de rose pur.	rouge jaunâtre.
Mica du Vésuve.	vert pistache.	brun de cannelle.
Chlorite du Zillerthal. . .	*idem.*	*idem.*
Saphir.	bleu de Prusse.	blanc verdâtre.
Émeraude du Pérou. . .	vert jaunâtre.	vert pur.
Béryl du Brésil.	*idem.*	vert bleuâtre.
Zircon.	brun de girofle.	vert jaunâtre.

Dans tous ces cristaux, la couleur des pans est un mélange des deux teintes O et E.

2° *Cristaux à deux axes.*

Supposons un cristal du système orthorhombique, ayant trois axes de cristallisation et d'élasticité rectangulaires, comme la cordiérite, l'andalousite ou la topaze. Appelons A la couleur de la base ou du plan normal à l'axe *a*, telle qu'on la voit à l'œil nu, B celle des pans antérieur et postérieur, qui répondent à l'axe *b*, et C celle des deux pans latéraux, qui correspondent à l'axe *c*. Si l'on place verticalement la base, ainsi que l'axe *b*, et que, dans cette position, on regarde avec la loupe, la couleur A de la base se résoudra en deux teintes, l'une ordinaire (*b*), qui sera de la couleur propre à l'axe *b*, l'autre extraordinaire (*c*), de la couleur de l'axe *c*. Si l'on redresse ensuite le cristal, de manière que la base redevienne horizontale, et qu'on dirige le dichroscope perpendiculairement aux pans, la couleur B se décomposera de même en deux teintes, l'une ordinaire (*c*), qui sera encore de la couleur de l'axe *c*, l'autre extraordinaire (*a*), de la couleur de l'axe *a*; et la couleur C, à son tour, se décomposera en une teinte ordinaire, de la couleur de l'axe *b*, et une teinte extraordinaire, de la couleur de l'axe *a*.

Tous les cristaux, transparents et colorés, des trois derniers systèmes, pourront donner lieu à des observations de ce genre, c'est-à-dire que chacun d'eux pourra manifester au moins six nuances différentes, savoir : trois couleurs de faces A, B, C, qu'on peut voir sans le secours de la loupe, et trois couleurs d'axes *a*, *b*, *c*, que l'on reconnait aisément avec le dichroscope. Les trois premières sont des mélanges des trois dernières; A est une couleur composée de *b* et de *c*; B est composée de *a* et de *c*; C l'est de *a* et de *b*.

Dans la cordiérite, la couleur A est un beau bleu, tirant un peu sur le gris; B, un bleu pâle; C, un gris jaunâtre. La couleur de l'axe *a* est le gris tirant sur le jaune; la couleur de l'axe *b*, un gris bleuâtre; celle de l'axe *c*, le bleu foncé pur. Les minéraux contenus dans la table suivante, donnée par M. Haidinger, manifestent des différences de coloration analogue, bien qu'elles ne soient pas toutes également sensibles.

	COULEURS DE FACES.			COULEURS D'AXES.		
	A	B	C	*a*	*b*	*c*
Anhydrite d'Aussée	bleu-violet pâle.			bleu-violet	jaunâtre.	bleu-violet très-pâle.
Barytine de Felsœbanya.	jaune de vin foncé.			jaune de citron.	jaune de vin pâle.	jaune de vin foncé.
Barytine de Beira.	bleu de smalt.		jaune de vin.	jaune paille.	gris perle.	bleu-violet foncé.
Célestine de Herrengrund.	bleu de smalt.			bleu de cane.	bleu de lavande.	gris perle.
Diaspore de Schemnitz.	bleu de Prusse.	bleu-violet	vert d'asperge.	bleu de ciel.	jaune de vin.	bleu-violet
Topaze du Brésil.	jaune de miel rougeâtre.	jaune de vin.	jaune de miel pur.	jaune de vin.	jaune de miel.	jaune paille.
Péridot.	vert de pistache.			vert d'huile.	vert d'herbe.	vert de pistache pâle.

Le phénomène du polychroïsme n'est sensible que dans les cristaux colorés, dans ceux surtout qui présentent une coloration accidentelle, due au mélange des molécules propres d'une espèce avec celles d'une autre espèce isomorphe, ou bien avec des molécules hétéromorphes interposées entre les molécules essentielles et mêlées avec elles d'une manière intime, comme dans le quarz jaune et améthyste. M. de Sénarmont s'est demandé si la cause qui produit une extinction inégale de la lumière polarisée dans les substances biréfringentes ne pourrait pas être reportée, du moins en partie, à ces matières dont les cristaux, soit naturels, soit artificiels, sont souvent imprégnés et comme souillés, et qu'ils ont empruntées aux eaux-mères impures dans lesquelles ils se sont formés. Il a cherché à résoudre cette question par la synthèse; et des expériences qu'il a faites sur un grand nombre de sels qui avaient cristallisé en présence de matières tinctoriales diverses, il est résulté ce fait important, qu'une matière colorante, disséminée uniformément à l'intérieur du cristal, entre ses lames d'accroissement, mais absolument étrangère à sa constitution comme à sa structure, inerte chimiquement et s'éliminant d'elle-même par des dissolutions répétées et suivies de cristallisation dans l'eau pure, peut lui communiquer à un haut degré les propriétés du polychroïsme.

M. de Sénarmont cite, comme exemple de ce fait, de beaux cristaux d'azotate de strontiane hydraté, qui avaient été produits au milieu d'une teinture concentrée de bois de Campêche, amenée au pourpre par quelques gouttes d'ammoniaque. Ces cristaux, qui avaient pris une couleur comparable à celle de l'alun de chrome, lui ont offert un polychroïsme très-prononcé. La lumière blanche y développait par transmission, sous certaines incidences, une couleur rouge, et, sous d'autres, une couleur bleue et violette. Observés avec un prisme biréfringent, ces cristaux se dédoublaient en deux images, l'une rouge, l'autre d'un violet foncé; et ces images échangeaient leurs couleurs, en passant par l'égalité, à mesure qu'on faisait tourner la lame cristalline dans son propre plan. Enfin, deux pareilles lames, parfaitement transparentes, placées l'une sur l'autre dans une orientation inverse, arrêtaient complètement, ou du moins éteignaient en très-grande partie, la lumière blanche incidente, à la manière des tourmalines (1).

(1) *Expériences sur la production artificielle du polychroïsme dans les substances cristallisées*; par M. de Sénarmont. (*Comptes-rendus de l'Acad. des Sciences*, tome XXXVIII, p. 101; 1854.)

§ 20. *De la polarisation lamellaire.*

Il existe un certain nombre de substances cristallisées, apparıant au système régulier, qui ont la propriété de dépolariser rayons lumineux qui les traversent, de manière qu'ils proisent des phénomènes particuliers de polarisation chromaue : tels sont l'analcime, la boracite, le sel gemme, l'alun ımoniacal. Il importe aux minéralogistes de connaître cette rticularité, qui pourrait occasionner d'assez graves méprises : e a été cause, en effet, qu'on a cru pendant quelque temps à s effets de double réfraction dans ces substances, et par suite les anomalies aux lois générales de relation que nous avons exister entre ce phénomène et les systèmes cristallins. Une que de ces substances, placée dans la pince aux tourmalines isées, devient visible par la lumière qui la traverse, et l'on se pelle que c'est d'après un semblable caractère qu'on juge linairement de l'existence de la double réfraction dans une ne cristallisée.

Suivant M. Biot, qui a étudié avec beaucoup de soin la proiété dont il s'agit (1), elle est due à ce que tous les corps crislisés, indépendamment du pouvoir polarisant ordinaire, pronant de la structure simple qu'ils prennent toujours, quand ır formation a été continue, sont capables d'exercer un autre nre d'action polarisante, lorsque leur accroissement n'ayant lieu que par intermittences, leur masse présente cette structe cristalline composée, que nous avons nommée structure par perposition de lames ou de couches polyédriques (p. 303). De le nom de *polarisation lamellaire* que M. Biot a cru devoir nner à ce nouveau cas de polarisation chromatique, qui se ıuve encore lié, comme on le voit, à la cristallisation, mais qui montre cette fois indépendant du phénomène de la double fraction. C'est même dans les substances à réfraction simple e ses effets sont le plus sensibles, sans doute parce qu'ils ne nt point masqués par les effets particuliers de polarisation léculaire, qui sont propres à toutes les substances biréfrinntes.

En disposant dans le tube de son grand appareil de polarisan, un octaèdre d'alun ammoniacal, de manière que l'un des

1) Biot : *Mémoire sur la polarisation lamellaire*, dans le *Recueil des Mém.* l'*Acad. des Sciences*, tome XVIII, p. 681.

axes de l'octaèdre coïncide avec l'axe de l'appareil, M. Biot a remarqué que les rayons polarisés qui le traversent sont modifiés, excepté dans deux positions du cristal rectangulaires entre elles. Les rayons traversent le cristal sans être modifiés, quand leur plan de polarisation est parallèle ou perpendiculaire aux plans menés par l'axe de l'octaèdre normalement à ses faces : ces plans sont ce que M. Biot appelle les sections principales de l'octaèdre. La glace noire, qui sert d'analyseur, reste noire dans les deux cas d'exceptions dont nous parlons, tandis qu'elle devient visible dans toutes les autres positions du cristal. Suivant l'illustre physicien, ces cristaux octaèdres ont une structure lamellaire ou plutôt stratiforme ; ils sont formés de couches d'accroissement octaédriques, superposées les unes sur les autres, depuis le centre jusqu'à la superficie, en sorte qu'à chaque face du cristal correspond un système de lames planes qu'on peut comparer à une pile de glaces.

On sait qu'une pile de lames de verre planes a la propriété de polariser par réfraction les faisceaux de lumière naturelle qui les traversent obliquement. M. Biot compare l'action des systèmes lamellaires de l'alun ammoniacal à celle d'une pareille pile de glaces, en faisant remarquer toutefois que l'analogie est loin d'être complète. Dans le cas de la pile artificielle, la polarisation n'est pas chromatique, comme elle l'est dans le cas des piles naturelles de lames cristallisées. Pour celles-ci, la polarisation est colorée, comme dans le cas des lames très-minces de mica ou de gypse ; mais il y a cette différence entre ce dernier cas et celui dont nous nous occupons, qu'il faut ici une épaisseur sensible, dans chaque système lamellaire, pour que les effets de coloration apparaissent. Ajoutons encore que la pile de glaces imprime aux rayons de diverse réfrangibilité un seul mode de polarisation, ce qui est cause qu'ils ne sont pas affectés inégalement, quand on leur fait traverser ensuite des lames minces, et ne modifient pas les teintes propres de ces lames. Les systèmes lamellaires agissent tout autrement. M. Biot a reconnu que les piles cristallines se comportent généralement, comme ferait une lame mince biréfringente positive, dont la section principale serait dirigée normalement à leur plan de réfraction actuel.

L'action de pareilles piles est, en général, très-faible. En plaçant le cristal octaèdre d'alun de manière que le plan de la polarisation primitive soit à 45° des sections principales de ce

cristal, les quatre triangles qui forment la projection des faces de l'octaèdre deviennent visibles; mais, pour obtenir un phénomène sensible de coloration, il faut le plus souvent interposer, entre le cristal et le prisme de Nicol qui sert d'analyseur, une lame très-mince de gypse, qui seule produirait déjà une couleur uniforme : par l'action combinée du cristal et de la lame de gypse, des changements ont lieu dans la teinte propre de cette lame, et la teinte résultante indique le sens et la nature de l'action additionnelle. On choisit la lame dans la condition de minceur qui rend sa teinte propre plus rapidement et plus vivement modifiable; c'est ce que M. Biot appelle une lame sensible. En opérant ainsi avec l'alun ammoniacal, on voit les quatre triangles dont nous avons parlé se colorer vivement de teintes contraires; par exemple, deux triangles opposés sont verts, et les deux autres rouges. L'action du sel gemme est analogue, ainsi que celle du chlorhydrate d'ammoniaque.

Des traces de dépolarisation ont été aussi remarquées dans les cristaux d'amphigène, de fluorine, de boracite, de blende et de diamant. Dans les cristaux trapézoèdres d'analcime, M. Brewster a depuis longtemps observé, dans la lumière polarisée, un très-beau phénomène de couleur, qui rentre dans la classe de ceux que nous étudions en ce moment. Si l'on suppose un cube inscrit dans le trapézoèdre, et si par son centre on mène des plans qui passent par tous les côtés et toutes les diagonales, et se prolongent jusqu'à la surface du trapézoèdre, celui-ci se trouvera partagé en vingt-quatre tétraèdres irréguliers. Toutes les faces de ceux-ci, qui passent par les arêtes du cube, passeront également par des arêtes dans le trapézoèdre; et celles qui passent par les diagonales dans le cube passeront pareillement par les diagonales du trapézoèdre, partageant en deux leurs angles obtus. Or, il résulte des observations du docteur Brewster, que toutes les molécules situées en un point quelconque de l'un de ces plans sont privées du pouvoir polarisant, et que plus une molécule est éloignée de ces plans, plus son pouvoir est énergique, et plus la teinte qu'elle polarise a d'intensité.

Ce n'est pas seulement dans les substances qui appartiennent au système régulier, que ces phénomènes de polarisation lamellaire peuvent être observés. Le même physicien anglais en avait reconnu les effets dans deux autres minéraux, dont l'un appartient au système quadratique, et l'autre au système orthorhombique. L'apophyllite de Feroë cristallise en prismes carrés, ter-

minés par des pyramides régulières à quatre faces. Ces cristaux possèdent un clivage très-facile, parallèlement à la base, et de plus, suivant M. Biot, un tissu lamellaire parallèlement aux faces obliques, et qui est la cause des beaux phénomènes de couleur observés par M. Brewster. Si, comme dans l'expérience de l'alun ammoniacal, un rayon polarisé est transmis dans la direction de l'axe, les systèmes lamellaires obliques agissent sur ce rayon, et les quatre faces des sommets se colorent de teintes opposées, généralement rouges et vertes, exactement comme dans l'alun octaèdre. Si l'on couche ensuite ces cristaux sur une face du prisme, pour les observer transversalement, on aperçoit alors un magnifique dessin colorié, une sorte de mosaïque de couleurs, formée de divers compartiments dont chacun polarise une teinte particulière. Dans la variété que M. Brewster a nommée *tessélite*, le même cristal paraît offrir dans ses diverses parties des variations notables de structure et peut-être même de composition moléculaire : certaines de ces parties sont à un seul axe optique, tandis que d'autres sont à deux axes. La topaze du Brésil, taillée perpendiculairement à l'axe du prisme rhombique fondamental, se montre aussi partagée en un certain nombre de compartiments qui se distinguent par leur éclat et par leurs nuances.

§ 21. *Du phénomène de l'astérie.*

La polarisation lamellaire, comme on vient de le voir, est un indice probable de l'existence dans un minéral cristallisé de ce genre de structure composée qui résulte de la superposition de couches polyédriques, séparées quoique adhérentes, et distinctes les unes des autres. Citons encore un phénomène de lumière, qui pourra servir à nous révéler une autre sorte de structure d'aggrégation dans les cristaux : c'est le phénomène de l'*astérie*. Il consiste dans des lignes brillantes, formant ordinairement, par leur répétition en divers sens, des croix ou des étoiles lumineuses, et qu'on aperçoit quand on regarde par réflexion ou par réfraction, dans certains cristaux, l'image du soleil, ou celle d'un point rayonnant quelconque, comme la lumière d'une bougie. Ce phénomène se montre de la manière la plus simple dans des cristaux qui sont composés de fibres ou de lames étroites parallèles, comme dans certaines plaques de gypse. En les plaçant entre l'œil et la lumière, on aperçoit une seule ligne

nineuse, qu'on peut appeler une ligne astérique, et dont la ection est transversale par rapport aux fibres : c'est le phénone réduit à sa forme la plus simple. L'œil de chat ou le quarz itoyant des lapidaires n'est qu'un quarz pénétré de filaments eux d'asbeste, tous parallèles entre eux, et ce sont ces filants qui produisent le jeu de lumière que l'on remarque dans te variété, comme Werner et Saussure l'ont parfaitement bli.

Mais il arrive souvent que le phénomène a lieu dans des subnces qui n'offrent aucune apparence de fibres, et qu'il se ré-e en plusieurs sens à la fois: dans ce cas, il est le résultat ne structure cristalline d'aggrégation, ayant pour éléments petits cristaux de même forme, apposés parallèlement les uns c autres, et composant le plus souvent un cristal d'une autre me, à surface profondément striée ou cannelée, comme on le t dans ces groupements directs d'un grand nombre de crisux élémentaires, dont il a été question page 192, et dans les dèles de décroissement que représentent les figures 23 et , pl. XV. Ces petits cristaux, disposés par files rectilignes, nposent des stries ou arêtes cunéiformes, qui sont réfléchisntes, aussi bien que les fibres dont nous parlions tout-à-l'heure, unes et les autres pouvant être considérées comme de petits roirs plans, très-étroits et très-allongés. Chaque système de fies ou de stries parallèles donne naissance à une ligne ou nde lumineuse, qui se montre toujours en travers de leur dition, et que forme la lumière émanée du point rayonnant, en reflétant sur ces éléments linéaires de structure, soit au dens du cristal, lorsqu'on vise à travers sa masse, soit seulement a surface, lorsque la lumière ne pénètre pas dans l'intérieur. Ainsi donc, ce phénomène est en rapport manifeste avec la position des fibres, des stries ou des files de particules, dans cristaux aggrégés, et par conséquent avec les conditions parulières de leur structure; et c'est sous ce point de vue qu'il est éressant pour le minéralogiste. Un système unique de fibres de stries engendre une seule ligne lumineuse, que l'on voit s-nettement, si l'on regarde à travers une plaque taillée palèlement à la direction des stries. Si le cristal offre dans son érieur deux séries différentes de files de particules, à angle oit l'une sur l'autre, et qu'on le taille en lame parallèle aux ux directions à la fois, on aperçoit dans ce cas une croix luneuse rectangulaire. Si, comme cela a lieu souvent dans les

espèces rhomboédriques, il existe trois séries semblables dont les directions, parallèles à un même plan, se coupent sous des angles de 60°, on verra une étoile régulière à six branches, si l'on regarde à travers une lame taillée parallèlement à ce plan. Toutes les substances à systèmes de fibres ou stries parallèles, et qui donnent lieu à des lignes astériques, quand on les taille parallèlement aux stries, produisent un autre phénomène de lumière, quand elles sont taillées en plaque perpendiculairement aux stries : on voit alors un cercle lumineux, que M. Babinet nomme *cercle parhélique*, qui passe par le point éclairant, et dont le plan est normal à la direction des éléments linéaires de la structure.

Le phénomène de l'étoile à six rayons a lieu par réflexion dans les corindons saphirs, dont les cristaux appartiennent au système rhomboédrique. Il a été observé et décrit pour la première fois par un ancien lapidaire de Hambourg ; mais c'est à Saussure qu'on en doit l'explication, comme on peut le voir au quatrième volume de son *Voyage dans les Alpes* (n° 1891, édition de 1786). Ce célèbre naturaliste rapproche le phénomène complexe de l'étoile du saphir de celui de la simple bande lumineuse produite par le quarz chatoyant, et il l'attribue aux systèmes triangulaires de stries ou de raies parallèles qui se montrent à la surface et dans l'intérieur de la pierre. Il observe celle-ci avec une lentille afin d'en mieux saisir la structure, et il aperçoit dans toute l'épaisseur du cristal une multitude de traits déliés et rectilignes, qui se croisent entre eux sous des angles de 60 et de 120 degrés, les mêmes que ceux que font entre elles les bandes lumineuses. Il pense que ces traits proviennent de solutions de continuité qui ont eu lieu dans l'accroissement du cristal, et cite des saphirs où les tranches successives des couches d'accroissement sont aussi visibles que celles du feldspath adulaire et figurent des hexagones réguliers, emboîtés les uns dans les autres et allant en décroissant jusqu'au centre. Il remarque enfin que le centre de l'étoile se déplace quand on change la position du cristal, et que sa lumière est d'une autre nuance que celle de la pierre.

Haüy a proposé, après Saussure, une autre explication du phénomène, qui est bien moins satisfaisante que celle du savant genevois. Il fait partir les reflets chatoyants, non de lignes réfléchissantes, mais de véritables plans, savoir : des joints ou plans de clivage du cristal, et raisonne comme si l'astérie n'était point

phénomène de position dont le centre varie avec la situation la pierre et celle de l'œil de l'observateur relativement au point airant. M. Babinet, qui ne paraît pas avoir eu connaissance l'explication de Saussure, a été ramené par ses propres recher-es à la véritable théorie du phénomène, qu'il a généralisée et pliquée à plusieurs autres substances.

Certains grenats rouges, surtout ceux de forme trapézoïdale qui sont couverts de stries parallèles aux arêtes du rhombo-dodécaèdre, lorsqu'on les taille en plaque perpendiculaire à l'axe i passe par deux angles trièdres opposés du même dodécaèdre, qu'on vient ensuite à regarder un point lumineux au travers ıne pareille plaque, offrent par réfraction un phénomène ana-ue à celui du corindon astérie. On aperçoit, lorsqu'on vise à flamme d'une bougie, une étoile à six branches d'une teinte s-vive, qui paraissent se diriger vers les angles de l'hexagone mé par la coupe transversale du dodécaèdre. En outre, on narque une courbe lumineuse circulaire qui passe par le point croisement des branches de l'astérie, c'est-à-dire par le point nineux; cette courbe est un cercle parhélique, suivant l'expres-n dont se sert M. Babinet.

Ces phénomènes doivent être attribués à quatre systèmes de nes parallèles miroitantes, de stries ou de solutions de conti-ité linéaires, qui existent à l'intérieur de la masse, par suite l'accroissement intermittent du cristal et de la structure cris-line composée qui en a été le résultat. Ces lignes intérieures structure correspondent, selon nous, aux stries superficielles s faces, c'est-à-dire aux arêtes du dodécaèdre, et non pas aux andes diagonales des rhombes, comme le suppose M. Babinet ns son mémoire sur les phénomènes astériques. Cette manière voir est plus en harmonie avec ce que nous connaissons de structure et des formes du grenat, et conduit à une explica-on plus plausible du phénomène particulier que l'on observe ans cette espèce. Lorsqu'on regarde un grenat dodécaèdre dans direction d'un de ses axes ternaires ou rhomboédriques, un es quatre systèmes d'arêtes, et par conséquent de stries ou li-nes réfléchissantes intérieures, se trouve dirigé parallèlement l'axe : c'est ce système qui donne le cercle parhélique. Les trois itres sont sensiblement parallèles au plan perpendiculaire et alement inclinés entre eux : ce sont ceux qui produisent les mès astériques. Lorsqu'on taille certains grenats perpendicu-rement à l'un des axes qui passent par deux angles tétraèdres

opposés, on aperçoit quelquefois une étoile à quatre branches, dont l'explication peut être ramenée très-facilement aux mêmes accidents de structure intérieure.

Nous venons de voir des phénomènes particuliers de lumière se rattacher à deux modes différents de structure composée, les structures par aggrégation de lames ou de fibres. Il existe encore un jeu de lumière, qui se rattache aussi à un autre mode de structure d'aggrégation, savoir : la structure granulaire. Mais, pour qu'il se manifeste, il faut que les grains aient partout une épaisseur sensiblement égale. Si le minéral est taillé en plaque mince, et qu'on le place entre l'œil et la lumière, on aperçoit un phénomène de couronne lumineuse, pareil à celui que l'on voit quelquefois autour du soleil ou de la lune, un cercle coloré qui entoure le point pris pour mire, au lieu de passer par ce point, comme ferait un cercle parhélique. On reproduit artificiellement ce phénomène, en recouvrant une lame de verre d'une couche mince de poussière de lycopode.

§ 22. *De la réflexion de la lumière.*

Les rayons de lumière qui tombent sur un corps à surface polie, et qui ne le traversent pas ou ne sont pas absorbés par lui, subissent, comme tout le monde le sait, deux espèces de réflexion, l'une irrégulière et qui se fait dans toutes les directions à la fois, l'autre régulière et qui n'a lieu que dans une seule direction, déterminée par celle de la lumière incidente. On distingue, en général, dans l'impression que font sur l'organe de la vue les rayons ainsi réfléchis, deux effets différents, susceptibles chacun de modifications nombreuses et particulières : ces effets sont ce qu'on appelle l'*éclat* et la *couleur*. On les attribue à l'état de la surface du corps; et cependant on doit dire qu'ils n'en viennent pas toujours d'une manière immédiate, et qu'ils sont souvent influencés par les couches voisines de cette surface, et même, dans les substances transparentes, par des couches plus profondes encore. Un corps coloré se comporte en cela, comme le fait un corps vibrant dans la réflexion des ondes sonores : et l'éclat est en quelque sorte à la couleur, ce qu'est le timbre à la tonalité dans nos instruments de musique. Nous renvoyons tout ce qui regarde les variations de ces deux caractères, ainsi que les divers degrés de transparence des corps, au chapitre où nous traiterons des caractères extérieurs des miné-

raux, c'est-à-dire de ceux qui déterminent plus particulièrement leur *facies* ou leur physionomie. Nous ne parlerons ici que des lois relatives à la lumière réfléchie, et des modifications qu'elle éprouve dans un corps cristallisé, par suite des différences que présentent la texture des faces du cristal, et la densité des files moléculaires qui composent chacune d'elles.

On sait quelle est la loi de la réflexion régulière, en ce qui concerne les directions des rayons incident et réfléchi. Lorsqu'un faisceau de lumière naturelle tombe sur un corps uniréfringent, dont la surface est plus ou moins polie, la portion de ce faisceau qui se réfléchit, comme celle qui se réfracte, est toujours plus ou moins polarisée, suivant la grandeur de l'angle d'incidence. L'angle particulier sous lequel les diverses surfaces réfléchissantes polarisent la lumière en plus grande proportion, s'appelle *angle principal* d'incidence, ou *angle de la polarisation maxima*. Il peut se déterminer avec un goniomètre à réflexion, et une plaque de tourmaline, dont l'axe soit perpendiculaire au plan de réflexion. L'angle d'incidence pour lequel le rayon réfléchi s'éteint complètement, quand on l'observe au travers de la tourmaline, est l'angle que l'on cherche. Nous avons déjà dit (p. 367) que, d'après une loi découverte par le docteur Brewster, l'angle de polarisation est celui pour lequel le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté correspondant, c'est-à dire, que la tangente de cet angle est égale à l'indice de réfraction du corps.

La détermination de cet angle peut, comme celle de l'indice de réfraction, fournir un caractère important pour la distinction des espèces minérales. Dans l'alun, il est égal à 55°22' (étant compté de la normale), et, pour ce corps, la polarisation est complète; tandis que pour la plupart des autres minéraux, elle n'atteint que son maximum dans le cas de l'incidence principale. Dans le diamant, l'angle de polarisation est de 67°30'; il est de 67°6' dans la blende; de 60°30' dans le grenat; de 60°25' dans le spinelle, etc.

M. Brewster a fait la remarque importante que l'angle de polarisation à la surface des cristaux biréfringents n'est pas rigoureusement le même dans tous les plans d'incidence : la variation, toutefois, est excessivement faible dans le plus grand nombre des cas.

Les physiciens se sont occupés aussi de rechercher les lois qui règlent l'intensité de la lumière réfléchie, connaissant celle

de la lumière incidente et la grandeur de l'angle d'incidence. Fresnel a trouvé des formules qui se rapportent à la réflexion par les corps uniréfringents; M. Neumann a étendu ce genre de recherches au cas des cristaux biréfringents, et il a fait voir l'influence qu'exercent alors sur les phénomènes la position variable de la face cristalline réfléchissante, et celle du plan d'incidence, à l'égard des axes du cristal. Lorsque la lumière incidente est déjà polarisée, on observe en général dans le rayon réfléchi une déviation du plan de la polarisation primitive : mais dans chaque plan d'incidence, il existe toujours un certain angle d'incidence, pour lequel cette déviation est nulle.

§ 23. *De la phosphorescence, et de la fluorescence.*

Il est un certain nombre de minéraux qui ont la propriété de devenir lumineux par eux-mêmes, et, par conséquent, de pouvoir luire dans les ténèbres, en émettant des rayons de telle ou telle nuance, ce qui vient de ce que leurs propres molécules sont mises dans un état vibratoire, capable d'ébranler l'éther qui est en connexion intime avec elles. On développe cette faculté dans les minéraux qui peuvent l'acquérir, par l'action des divers agents impondérables, la lumière, la chaleur, l'électricité, et aussi par l'action du frottement, qui est lui-même une cause de chaleur et d'électricité.

Il y a des corps dans lesquels le plus léger frottement, celui de la pointe, ou même de la barbe d'une plume, suffit pour produire une traînée lumineuse dans l'obscurité; telles sont, par exemple, certaines variétés de blende fibreuse. D'autres exigent un frottement plus fort et comme une sorte de percussion : en frappant l'un contre l'autre deux fragments de quarz-hyalin ou de silex, on produit au point de contact une lumière plus ou moins vive. On rend encore certains minéraux phosphorescents en les chauffant plus ou moins fortement. La poussière de l'apatite terreuse donne une belle lueur jaune, lorsqu'on projette sa poussière sur une pelle chaude dans l'obscurité; certaines variétés de fluorine produisent, dans les mêmes circonstances, une belle couleur verte, et à cause de cela ont été nommées *chlorophanes*. Il est des substances qui, pour devenir phosphorescentes, n'exigent qu'une faible chaleur, comme celle de la main par exemple; d'autres demandent la température de l'eau bouillante, ou même des températures beaucoup plus élevées.

Certains minéraux deviennent phosphorescents lorsqu'on les soumet à l'influence de la lumière électrique, en faisant passer sur eux des décharges électriques; on parvient même par ce moyen, à rendre la propriété dont il s'agit à certains corps qui l'ont perdue, pour avoir été soumis à une trop forte calcination.

Mais le principal moyen dont se servent les physiciens, pour étudier cette propriété dans les diverses substances, soit naturelles, soit artificielles, c'est l'insolation, c'est-à-dire l'exposition du corps aux rayons directs du soleil pendant un nombre de secondes plus ou moins grand. Ce moyen permet d'observer le phénomène dans les conditions qui le rendent le plus sensible, de reconnaître sa persistance, et de déterminer sa durée, depuis l'instant où la cause qui l'a produit, a cessé d'agir; c'est en l'employant que les physiciens ont obtenu les résultats les plus variés et les plus remarquables.

On peut constater aisément cette propriété dans certains diamants et dans plusieurs autres minéraux, en présentant le corps pendant quelques instants aux rayons solaires, et le faisant glisser de suite au fond d'un canon de pistolet. Aussitôt que l'on place l'œil à l'orifice du canon, on voit briller le corps s'il est phosphorescent. Mais la meilleure manière de faire cette expérience, c'est d'opérer dans une chambre noire, au volet de laquelle on a pratiqué une trappe en coulisse. On ouvre celle-ci, pour présenter le corps qu'on a réduit en poudre, pendant quelques secondes à la lumière; puis on le retire vivement et l'on referme la trappe : l'observateur, à qui l'on fait voir ce phénomène, doit tenir les yeux fermés, pendant que la trappe est ouverte, afin que sa rétine soit sensible à la plus faible radiation lumineuse. La durée de la phosphorescence, ainsi constatée, est très-variable, et, pour beaucoup de substances, elle n'est que de quelques secondes; pour quelques-unes même, cette durée est difficile à apprécier. M. Edmond Becquerel est parvenu à l'observer, très-peu d'instants après l'action de la lumière, au moyen d'un instrument qu'il a imaginé pour cela, et qu'il appelle le *phosphoroscope* (voyez les *Comptes-Rendus de l'Académie des sciences*, 24 mai 1858); il a pu s'assurer ainsi que ce phénomène est beaucoup plus général qu'on ne le pense, et arriver à se convaincre qu'il n'y a pas de différence essentielle entre la phosphorescence proprement dite et ce phénomène du même genre, que les physiciens, dans ces derniers temps, avaient cru devoir distinguer par le nom particulier de *fluorescence*. Selon Stokes et

plusieurs autres savants, la phosphorescence consisterait essentiellement dans la persistance de l'impression produite par la lumière, au-delà du moment où elle a cessé d'agir sur la substance impressionnable; et la fluorescence, au contraire, dans un effet non permanent, qui cesse aussitôt que le corps n'est plus soumis à l'influence immédiate de la lumière solaire. Ajoutons à cela que, dans les cas de fluorescence, le corps ne se borne pas à réfléchir la lumière qu'il reçoit, mais qu'il est lumineux par lui-même, aussi bien que les corps phosphorescents, ce que l'on reconnaît à ce qu'il émet des rayons d'une couleur toute différente. On a donné à ce phénomène particulier le nom de *fluorescence*, parce qu'on l'a observé d'abord dans le spath fluor; mais il existe aussi dans le diamant, et à un degré très-marqué dans plusieurs substances organiques (le bisulfate de quinine, par exemple). M. Edmond Becquerel, par de nouvelles recherches, a été conduit à penser que les deux phénomènes, qu'on a cru devoir distinguer, en leur assignant des noms particuliers, ne diffèrent au fond l'un de l'autre que par le temps pendant lequel l'impression de la lumière peut se conserver; et, pour lui, la fluorescence est une phosphorescence qui ne dure qu'un instant inappréciable.

Le phénomène de la phosphorescence a été étudié avec soin par plusieurs physiciens distingués, et entre autres par M. Dessaignes, le docteur Brewster et MM. Becquerel père et fils. Ces physiciens ont cru reconnaître que la lumière phosphorique était identique avec la lumière électrique, et qu'un dégagement d'électricité accompagnait toujours l'émission de la première. M. Dessaignes, dans un Mémoire couronné par l'Institut en 1809, a parfaitement bien étudié toutes les circonstances de ce phénomène, faisant remarquer que dans un grand nombre de cristaux où il se manifeste, il est en rapport avec la structure cristalline, et avec les directions des clivages les plus faciles. La lueur phosphorique n'apparaît pas, en effet, sur toutes les faces indistinctement, et sur la face où elle se montre, elle n'est pas répandue également partout : elle paraît quelquefois sous la forme de raies lumineuses, qui répondent aux intersections de la face que l'on considère avec les clivages qui la coupent obliquement; ce que M. Dessaignes attribue à un dégagement de fluide électrique qui s'opèrerait le long des arêtes aiguës, formées par ces intersections. Selon lui, les faces d'un rhomboèdre de calcaire spathique, celles d'un octaèdre de diamant, restent

ténébreuses, tandis que les faces triangulaires du rhomboèdre basé, dans la première substance, les faces carrées du cubo-octaèdre, dans la seconde, deviennent lumineuses.

La propriété phosphorescente est surtout sensible dans les substances qui sont composées de fluorures ou de sulfures métalliques, ou qui renferment au moins un de ces corps binaires dans leur composition. Certains sels, qui ne sont point phosphorescents par eux-mêmes, le deviennent après avoir été fortement calcinés au contact du charbon. C'est ainsi qu'on formait anciennement le phosphore artificiel, dit *phosphore de Bologne*. On le fabriquait avec une variété fibreuse de sulfate de baryte, trouvée au mont *Paterno* près de cette ville, et que l'on chauffait fortement avec des matières organiques : le sulfate de baryte était en partie décomposé, et transformé en sulfure de baryum, qui donnait lieu ensuite à la phosphorescence.

CHAPITRE XII.

PROPRIÉTÉS DÉPENDANTES DE L'ÉLECTRICITÉ ET DU MAGNÉTISME.

Il ne nous reste plus, pour terminer l'étude des caractéres physiques des minéraux, qu'à faire un exposé rapide de quelques propriétés particulières à certains corps, ou qui ne se montrent dans les minéraux que passagèrement et sous l'influence de certaines circonstances extérieures. Telles sont celles qui se rapportent aux actions électriques et magnétiques.

§ 1. *Propriétés électriques.*

Les minéraux, comme tous les autres corps, sont capables d'acquérir la vertu électrique ; mais ils diffèrent beaucoup entre eux, soit par la manière dont ils peuvent s'électriser, soit par la nature de l'électricité qui se développe en eux, soit par le plus ou moins de facilité avec laquelle ils la conservent ou la transmettent aux autres corps. La plupart d'entre eux ne s'électrisent que lorsqu'on les a frottés avec un autre corps, tel qu'un morceau de drap ; quelques-uns deviennent électriques, lorsqu'on se borne à les presser entre deux doigts ; d'autres enfin, mais en

petit nombre, le deviennent lorsqu'ils sont soumis à un certain degré de chaleur.

Sous le rapport de la faculté conservatrice de l'électricité, on distingue les minéraux en deux catégories : les minéraux *isolants*, qui retiennent le fluide électrique comme engagé dans leurs pores, sans lui permettre de se répandre sur les corps environnants, et qu'on peut électriser par le frottement en les tenant entre les doigts ; et les minéraux *conducteurs*, qui transmettent plus ou moins facilement le fluide électrique aux corps en contact avec eux, et qu'on ne peut électriser qu'après les avoir isolés, c'est-à-dire après les avoir fixés sur un support fait d'une matière isolante. Les substances qui sont transparentes et incolores dans leur état de perfection, sont en général isolantes et acquièrent par le frottement l'électricité vitrée ou positive : tels sont les minéraux d'apparence vitreuse ou lithoïde. Les substances douées d'une couleur propre, et de nature résineuse, sont pareillement isolantes, mais elles prennent par le frottement l'électricité résineuse ou négative. Les substances essentiellement opaques et douées de l'éclat métallique, sont conductrices, et acquièrent, lorsqu'elles sont isolées et frottées, les unes l'électricité positive, les autres l'électricité négative. Pour pouvoir établir sous ce rapport une comparaison entre les différents minéraux, il faut se servir toujours du même frottoir pour les électriser.

On détermine la nature de l'électricité acquise à l'aide du frottement ou de la pression, en présentant le minéral électrisé à un petit appareil qu'on appelle *électroscope*, et qui se compose essentiellement d'une aiguille métallique horizontale, qui se meut sur un pivot, comme une aiguille de boussole. On communique à cette aiguille, dont le support est rendu isolant, une électricité connue, et si l'on obtient une répulsion, lorsqu'on lui présente le minéral frotté, on en conclut que celui-ci possède la même espèce d'électricité. Il est bon d'avoir deux électroscopes, dont l'un soit à l'état d'électricité positive, et l'autre à l'état d'électricité négative. Haüy formait l'électroscope de la première espèce, avec une aiguille de laiton terminée d'un côté par un globule du même métal, et de l'autre côté par un petit morceau de spath d'Islande bien transparent. Il lui suffisait de presser ce spath entre deux doigts, pour le rendre électrique. Pour se procurer un électroscope de seconde espèce ou négatif, il remplaçait l'aiguille précédente par une simple aiguille métallique, terminée par des globules et garnie en son milieu d'une chape de cristal

de roche qui servait à l'isoler. Pour lui communiquer l'électricité négative, il touchait un des globules avec un bâton de cire d'Espagne, qu'il avait frotté, à plusieurs reprises, sur un morceau de laine ou de drap. Les caractères que l'on constate à l'aide de ces petits appareils peuvent servir à distinguer quelques substances; mais il ne faut pas leur accorder une confiance trop absolue. Ils ne dépendent pas seulement de la nature du corps, mais encore de l'état de ses surfaces : et ils sont sujets à varier dans la même espèce, et quelquefois dans la même variété. Certains cristaux de disthène s'électrisent positivement sur une face, et négativement sur une autre; et c'est pour cela que Haüy a donné à ce minéral le nom de *disthène* (qui a deux vertus).

Pour reconnaître si un minéral est isolant ou conducteur, on le frotte en le tenant à la main, et on le présente à l'aiguille mobile, qu'on a eu soin de laisser dans son état naturel. Si le corps est isolant, il aura conservé son électricité, et dans ce cas il attirera l'aiguille; mais, s'il est conducteur, il sera sans aucune action sur elle.

Nous avons dit que les minéraux différaient beaucoup entre eux sous le rapport de la faculté conservatrice de l'électricité, c'est-à-dire du plus ou moins de temps pendant lequel ils persistent dans l'état électrique. Et, en effet, le spath d'Islande et la topaze incolore du Brésil ne perdent tout signe d'électricité qu'au bout de plusieurs jours. Le diamant et le cristal de roche ne gardent pas leur électricité plus d'un quart-d'heure; et il en est enfin qui ne la conservent que pendant quelques instants.

C'est parmi les minéraux isolants que se rencontrent ceux qui peuvent s'électriser par la chaleur, c'est-à-dire qui sont *pyroélectriques*. Mais il importe de faire ici une distinction, sans laquelle nous serions exposés à confondre entre elles des choses très-différentes, comme il est arrivé à des physiciens d'ailleurs très-distingués. Il y a deux espèces de pyroélectricité : l'une, qu'on peut appeler simple, et qui consiste dans le développement d'une seule espèce d'électricité sur toute la surface du corps, ainsi que cela aurait lieu par le frottement ou la pression : c'est un phénomène ordinaire de tension électrique, dont la chaleur n'est ici que la cause occasionnelle, et qui peut s'observer dans des substances nombreuses, de nature très-diverse, cristallines ou non, organiques ou inorganiques. L'autre espèce de pyroélectricité est beaucoup plus rare; elle ne se montre que dans les substances cristallisées, et seulement dans celles qui présentent,

dans leur structure comme dans leur forme, une hémiédrie polaire. Elle doit donc être peu commune, et l'on a eu tort de la confondre avec la précédente, dont elle se distingue par des caractères tout particuliers, qui en font une propriété des plus curieuses et des plus importantes. On peut l'appeler la *pyro-électricité polaire :* car elle consiste en ce que certains cristaux, que l'on chauffe ou que l'on refroidit uniformément, manifestent, tant que leur température est croissante ou décroissante, les deux électricités à la fois, mais seulement dans des points séparés, situés ordinairement aux extrémités d'un même axe, et auxquels on peut donner le nom de pôles électriques.

Ce phénomène a été observé d'abord dans les aiguilles de tourmaline et les prismes de topaze; Haüy l'a retrouvé ensuite dans plusieurs autres substances, telles que la boracite, la calamine et la prehnite. Il l'a étudié avec soin, et nous a révélé une circonstance importante du fait dont il s'agit, savoir : l'existence d'une corrélation entre la différence de nature des pôles électriques et la différence de forme des parties où ils résident ; M. Becquerel a fait connaître ensuite les autres particularités du phénomène, et les conditions physiques qui peuvent amener le renversement des pôles dans le même cristal.

Dans les cristaux de tourmaline, et dans ceux de boracite, il existe toujours une différence de configuration dans les sommets où résident les pôles de noms contraires, bien que ces sommets correspondent à des parties qui, dans la forme fondamentale, sont géométriquement égales. Dans la tourmaline, les cristaux appartiennent au système rhomboédrique, et ont, par conséquent, un axe principal de symétrie. Chauffés ou refroidis, ils acquièrent des pôles, au nombre de deux seulement; ces pôles sont situés aux extrémités de l'axe de cristallisation, qui devient ainsi un axe électrique, et les sommets correspondants diffèrent en général par leur forme, l'un d'eux présentant toujours un plus grand nombre de facettes que l'autre. Dans les cristaux de boracite, dont la forme ordinaire est le cube, on observe toujours huit pôles et quatre axes électriques, qui se confondent avec les diagonales du cube. Ces pôles ne sont identiques que quatre par quatre, de manière que deux pôles contraires sont toujours diamétralement opposés. Et l'on observe encore ici une configuration différente dans les deux sommets qui sont occupés par des pôles de nature différente.

Haüy, qui dans ces cas ne pensait point à admettre une hé-

miédrie fondée sur des différences de structure moléculaire, considérait les cristaux de tourmaline et de boracite comme dérogeant à la loi générale de symétrie, et il cherchait à expliquer cette anomalie par les propriétés électriques. Il supposait que les forces de la cristallisation avaient agi, comme à l'ordinaire, pour produire les mêmes modifications aux extrémités d'un même axe, mais que cette tendance s'était trouvée contre-balancée par l'action de forces étrangères, qui étaient venues ajouter accidentellement leurs effets à ceux des premières; et ces forces perturbatrices lui paraissaient devoir être celles qui, sous l'influence de la chaleur, produisaient le développement de l'électricité polaire. Dès-lors, la dérogation à la loi de symétrie n'était plus qu'apparente; et il en était de cette loi, comme de celle de l'équilibre appliquée à une aiguille de boussole, dont les deux bras seraient parfaitement égaux en poids, et qui cependant ne pourrait se maintenir horizontale, si l'on venait à la soumettre à l'aimantation.

Frappé de la concomitance de ces deux faits, l'électricité polaire et la dissymétrie, il a cru pouvoir les expliquer l'un par l'autre, et par là il ne cherchait réellement qu'à sauver la difficulté cristallographique : mais il ne s'est point aperçu que, d'après sa manière de voir, l'électricité polaire restait inexpliquée, et, je dirai même plus, devenait tout-à-fait inexplicable. Car, dans les idées de Haüy, tout était parfaitement semblable, sous le rapport de la structure, aux extrémités des axes électriques. Dès-lors, comment concevoir, dans des parties que l'on suppose identiques, une opposition d'effets, comme celle qu'y fait naître le mouvement de la chaleur? Elle ne peut évidemment s'expliquer qu'en admettant qu'il y ait vers les deux sommets une différence physique, consistant, sinon dans un changement de nature des molécules, au moins dans une relation différente des molécules extrêmes avec les parties de l'espace qu'elles regardent. Or, cette différence existe bien réellement dans les cubes de boracite, comme dans les prismes de tourmaline, si l'on substitue au genre de structure adopté par Haüy pour chacune de ces substances, ceux que nous avons proposés dans le chapitre relatif aux systèmes cristallins (*voir* pages 34 et 144).

Les cristaux de boracite, considérés en eux-mêmes et indépendamment de la pyroélectricité, se modifient exactement comme le font les cubes du système tétraédrique; ils appartiennent donc à ce système, et leur structure doit ressembler à celle

que représente la figure 19, pl. I, c'est-à-dire qu'on peut les considérer comme formés d'éléments tétraédriques, tellement disposés, que toutes les files de molécules en diagonale soient hétéropolaires, comme celle de la figure 15, et que, dans un des sommets, les molécules se présentent à l'extérieur par leurs pointes, et dans le sommet opposé par leurs bases (fig. 19). Il y a donc une différence physique dans les sommets; et l'on peut s'appuyer sur elle, pour expliquer d'abord l'hémiédrie et ensuite l'électricité polaire.

En effet, cette différence physique une fois admise, les prétendues anomalies de forme disparaissent : l'hémiédrie polaire en dérive tout naturellement : elle n'est plus qu'une application particulière de la loi générale à certains cristaux, dans lesquels la symétrie réelle, basée sur l'identité absolue, diffère de la symétrie apparente, qui se rapporte purement à la forme extérieure. De plus, l'électricité polaire, ce phénomène sur la cause duquel Haüy et les physiciens se sont tus jusqu'à présent, est facile à concevoir. On aperçoit clairement la raison physique de cette singulière propriété, quand on songe aux résistances diverses que doivent offrir aux mouvements du fluide qui produit la chaleur et l'électricité, de pareilles files de molécules, selon que ce fluide parcourt le milieu dans un sens ou dans le sens contraire. On n'est plus surpris de rencontrer des propriétés physiques différentes dans des parties, de forme semblable à la vérité, mais où les molécules se présentent dans des situations diverses et opposées.

Ainsi, selon nous, l'électricité polaire et l'hémiédrie de même nom n'ont point entre elles la relation de cause à effet que Haüy leur suppose; mais ces phénomènes sont tous deux des conséquences d'un même fait primordial, qui a échappé à cet habile cristallographe, savoir : d'une forme et d'une structure moléculaire telles qu'il en résulte dans le cristal des files de molécules à extrémités dissemblables.

On peut généraliser l'explication précédente (1), en disant que, pour qu'une substance cristallisée manifeste la polarité électrique aux deux extrémités d'un même axe, il faut que ses molécules aient une forme tétraédrique, et que les files parallèles à cet axe soient hétéropolaires.

(1) Voyez le Mémoire déjà cité sur la Cristallisation, publié dans le tome VII des *Savants étrangers*, où cette explication a été donnée pour la première fois et étendue à plusieurs substances pyro-électriques.

Nous ferons observer toutefois que, si cette circonstance mble être une condition, *sine quâ non*, de la production du ιénomène, elle ne paraît pas suffire pour le déterminer, et l'il faut ici, comme dans d'autres cas où se manifestent les opriétés électriques, ajouter comme condition nouvelle, que minéral soit une substance isolante. Ainsi, la polarité élecique ne s'est point encore rencontrée dans les cristaux du cui-e gris, ni de la pharmacosidérite. On pourrait tout au plus la upçonner dans les minéraux tétraédriques, qui, comme la ende et l'helvine, sont situés pour ainsi dire à la limite qui pare les substances vitreuses des substances métalliques.

La pyroélectricité de la tourmaline et l'hémiédrie polaire qui ιccompagne, s'expliquent avec la même facilité. On a vu, ιge 145, que, pour rendre raison de tous les faits particuliers ιi caractérisent la cristallisation de cette substance, il suffirait admettre pour forme représentative de la molécule, ou du ιoins pour type de sa symétrie, un tétraèdre trigonal ou pyraιide droite à base triangulaire équilatérale (fig. 51, pl. III). La ructure de la tourmaline offre donc une certaine analogie ιec celle de l'espèce dont nous venons de parler : car elle offre, l'égard des substances rhomboédriques ordinaires, une héiédrie de même genre que celle de la boracite, relativement ιx substances cubiques proprement dites. Seulement, cette héiédrie polaire se borne ici à un seul axe (l'axe principal), au ιu de s'étendre à quatre axes égaux, comme celle de l'autre pèce. La seule différence qui existe donc entre les deux subιnces, c'est que l'une offre, dans quatre directions différentes, répétition exacte de ce qui n'a lieu pour l'autre que dans ιe seule direction.

L'hydro-silicate de zinc, substance du système orthorhomιque, présente, lorsqu'on l'a chauffé légèrement, un seul axe ectrique, qui se confond avec l'un des axes de cristallisation : ι voit souvent à l'une des extrémités de cet axe un sommet à ιatre faces d'octaèdre à base rhombe, tandis qu'à l'autre somet est un simple dôme, ou demi-prisme horizontal. La scoléte, autre espèce de silicate hydraté, possède aussi un axe élecique ; l'axinite en a deux.

Avant d'aller plus loin, je dois faire connaître les principaux ísultats que l'observation a fournis aux physiciens qui ont étuié cette curieuse propriété. M. Becquerel a reconnu qu'elle ne manifeste qu'autant que la substance est chauffée ou refroi-

die uniformément; et ce n'est que pendant que la température change, pendant qu'elle croît ou décroît, que les signes d'électricité apparaissent. Ils disparaissent aussitôt que la température devient stationnaire. Si, après avoir électrisé le cristal par échauffement et noté la position des pôles, on vient à l'électriser par refroidissement, on reconnaît que les pôles sont renversés, c'est-à-dire que le sommet, qui dans le premier cas était occupé par le pôle positif, présente le pôle négatif dans le second cas, et réciproquement. Supposons, par exemple, une aiguille de tourmaline, dont les deux extrémités soient marquées des lettres A et B : représentons par T la température variable par laquelle elle passe, quand elle donne des signes d'électricité, et pour indiquer le sens de la variation de cette température, mettons le signe +, ou le signe — devant la lettre T, suivant que la température sera croissante ou décroissante. Si, avec +T, on obtient +A et —B, avec —T on aura —A et +B; d'où l'on voit que l'une des extrémités A est toujours d'accord, et l'autre B toujours en désaccord, par le signe de l'électricité qu'elle prend, avec celui qui indique la marche de la température. Il existe donc une certaine relation constante entre la nature des sommets, celle des pôles, et le mouvement de la chaleur. Le sommet A est toujours occupé par un pôle qu'on peut appeler *analogue*, et le sommet B par un pôle qu'on peut désigner par le nom d'*antilogue*. MM. G. Rose et Riess, à qui l'on doit cette remarque, ont reconnu que généralement le pôle analogue réside dans celui des sommets où les faces du rhomboèdre primitif (le rhomboèdre de 133°) reposent sur celles du prisme trigonal hémiédrique (1). Il suffit d'indiquer la position de ce pôle dans le cristal, pour qu'on puisse conclure de cette seule donnée toutes les autres particularités du phénomène.

On constate aisément la pyro-électricité des tourmalines, en les électrisant par refroidissement. Pour cela, on les chauffe à la flamme de l'alcool, puis, les éloignant du feu, on les laisse revenir à la température ordinaire. C'est pendant ce retour qu'elles agissent sur les électroscopes. Haüy, à l'aide d'un petit appareil très-simple qu'il avait imaginé, faisait concourir les actions mutuelles de deux aiguilles de tourmaline à la manifestation de leurs propriétés électriques. Ce petit appareil se compose de deux pièces, mobiles l'une sur l'autre : la partie mobile

(1) Voyez le *Mémoire sur les propriétés pyro-électriques des minéraux*, par MM. Riess et G. Rose; *Annales de Poggendorff*, tome LIX, p. 353.

st une lame métallique de forme rectangulaire, relevée en querre à ses deux extrémités, où sont pratiquées des échanrures. Cette lame est disposée de manière à pouvoir tourner orizontalement, comme une aiguille de boussole, sur la seonde pièce de l'appareil qui fait l'office de pivot. Vers les exrémités de la face inférieure de la lame, sont attachés deux fils iétalliques qui se terminent en boules : ces boules de métal ont destinées à faire descendre le centre de gravité du système, e manière que la lame reste toujours soutenue pendant son iouvement de rotation.

Après avoir fait chauffer les deux tourmalines, on place l'une 'elles horizontalement dans les échancrures de la lame métallique, et l'on a de cette manière une espèce de boussole élecrique. On prend l'autre tourmaline avec une pince en acier, t on l'approche successivement par ses parties opposées de l'un u l'autre des pôles de la première tourmaline. En opérant ainsi, n observe tous les effets qu'on pourrait obtenir, en présentant n barreau aimanté aux pôles d'une aiguille magnétique ordiiaire.

Pour constater la pyro-électricité produite par un accroissenent continu de température, il faut se servir d'un autre appaeil imaginé par M. Becquerel, et qui se compose d'une cloche n verre, reposant sur une plaque métallique, qu'on chauffe paressous au moyen d'une lampe à alcool. Un fil de cocon desend dans la cloche, et supporte une tourmaline dans une posion horizontale; il y a en outre dans la cloche un électroscope pile sèche. A mesure que l'intérieur de la cloche s'échauffe, la mpérature de la tourmaline s'élève; et aussitôt qu'elle devient ectrique, elle se dirige entre les deux colonnes de la pile, de anière que les pôles contraires soient en regard; et si on la érange de cette position, elle y revient en exécutant une suite oscillations, qui non-seulement démontrent l'état électrique e la tourmaline, mais peuvent encore servir à en déterminer intensité.

Nous avons supposé jusqu'à présent que dans les cristaux pyroectriques les pôles étaient toujours placés à l'extérieur, aux deux ttrémités d'un même axe. C'est en effet le seul cas de pyrolectricité qui ait été admis pendant longtemps, celui auquel e rapportent toutes les lois et tous les résultats d'observation ui précèdent. Mais on doit à MM. Reiss et G. Rose la connaisance d'un cas de pyro-électricité tout différent, qu'ils ont re-

connu dans les cristaux de topaze et de prehnite ; ces cristaux sont des prismes droits à base rhombe. Là, les pôles électriques ne sont pas tous situés à la périphérie : les uns sont extérieurs, et les autres centraux. Si dans la topaze, qui se clive facilement parallèlement à la base, on observe l'état électrique du rhombe terminal, on trouve que les angles aigus de ce rhombe sont dans l'état naturel, tandis que les angles obtus sont électrisés de la même manière, occupés par conséquent par des pôles de même nom, qui, dans les deux substances précitées, sont des pôles antilogues. Les pôles opposés à ceux-ci se trouvent au centre du rhombe, dans l'axe du cristal. Il y a donc, dans ce cas, deux axes électriques, coïncidant chacun avec une moitié de la petite diagonale, et dirigés en sens inverses, de manière que leurs pôles analogues se confondent à l'intérieur; entre chaque pôle extérieur et le pôle intérieur opposé, se trouve un point neutre ou indifférent. Ces centres d'action intermédiaire rappellent les points conséquents qu'on observe quelquefois dans les barreaux aimantés.

Ce que nous venons de dire de la base supérieure du cristal, serait vrai de la base inférieure, comme aussi de toute section faite entre ces deux bases, en sorte que, dans ces cristaux, ce ne sont plus des pôles isolés, mais des lignes ou séries linéaires de pôles, qui résultent de l'action de la chaleur; et les deux arêtes longitudinales obtuses sont électrisées de la même manière en tous leurs points, tandis que l'axe central et vertical présente, dans toute sa longueur, une électricité contraire à celle des arêtes.

On doit remarquer ici que les pôles extérieurs étant tous de même nom, doivent résider en des points parfaitement identiques; il n'y a donc pas lieu, dans ce cas, à ces différences de configuration signalées par Haüy, et par conséquent les cristaux de topaze peuvent et doivent être parfaitement holoédriques, nonobstant leurs propriétés électriques. On ne peut plus ici expliquer ces propriétés par une simple hémiédrie polaire; et il faut admettre dans la topaze et dans la prehnite, un de ces genres de structure composée dont nous avons déjà eu l'occasion de citer des exemples, en traitant des propriétés optiques. Il doit y avoir discontinuité dans la structure, en ce sens que les éléments de cette structure doivent offrir une disposition inverse dans les deux moitiés de la petite diagonale. Chacun de ces demi-axes est en quelque sorte un axe hétéropolaire : mais les deux axes hé-

téropolaires sont renversés l'un par rapport à l'autre, et la structure générale du cristal n'est symétrique qu'à l'égard de l'axe central.

D'après les faits qui précèdent, il y a donc lieu maintenant de distinguer deux cas différents de pyro-électricité polaire : 1° celui des cristaux à pôles tous extérieurs ou *extéro-polaires;* c'est le seul qui soit en relation nécessaire avec l'hémiédrie polaire ou tétraédrique; et 2° le cas des cristaux à pôles en partie extérieurs et en partie centraux (cristaux *centro-polaires*), qui dépend sans doute d'une modification particulière de la structure interne, mais ne s'annonce point, comme le précédent, par des caractères tirés de la configuration extérieure.

La pyro-électricité polaire est, comme on vient de le voir, une propriété qui ne se montre que dans les substances cristallisées, et qui n'y est pas commune, parce qu'elle a sa raison d'être dans une structure, qui se rencontre elle-même assez rarement dans les minéraux, savoir celle d'où résulte une hémiédrie polaire ou tétraédrique. Il est une autre propriété électrique, beaucoup plus générale, qu'on peut aussi étudier dans les cristaux, et qui témoigne encore de l'influence qu'exercent la forme et la structure moléculaire sur tous les caractères physiques : c'est la conductibilité électrique, ou le pouvoir qu'ont les surfaces des corps cristallisés de conduire inégalement dans des directions différentes l'électricité de tension qu'on amène en un point déterminé, en touchant ce point avec l'extrémité déliée d'un fil conducteur métallique.

On doit à MM. Wiedemann et de Sénarmont des recherches importantes sur ce sujet, et dont les résultats sont, comme on pouvait le prévoir, en parfaite analogie avec ceux que donneraient, dans les mêmes circonstances, la conductibilité pour la chaleur et la propagation de la lumière (1). Le premier de ces observateurs saupoudrait les faces des cristaux de poussière de lycopode; cette poussière était repoussée dans tous les sens autour de la fine pointe de métal qui amenait l'électricité : mais, sur les cristaux du système régulier, elle l'était avec une égale force dans chaque direction, en sorte que l'espace ainsi balayé était circulaire; sur les faces des cristaux appartenant aux autres

(1) Wiedemann (*Mémoire sur les propriétés électriques des corps cristallisés*, lu à la *Société des Sciences physiques de Berlin*, le 2 février 1849).

De Sénarmont (*Mémoire sur la conductibilité des corps cristallisés pour l'électricité de tension; Comptes-Rendus de l'Acad.* 17 décembre 1849).

systèmes, on n'obtenait de cercles que pour celles qui étaient parallèles aux bases dans le second et le troisième système; dans tous les autres cas, on avait des ellipses, en sorte que la loi de conductibilité se montrait toujours d'accord avec la symétrie de la structure.

M. de Sénarmont opérait d'une facon toute différente. Il recouvrait la face cristalline d'une légère feuille d'étain, dans laquelle il avait découpé à l'emporte-pièce un trou circulaire; il plaçait au centre du cercle la pointe métallique du conducteur, cherchant par là à déterminer le passage de l'électricité entre cette pointe et la circonférence de l'armature métallique. Il est évident que l'électricité était sollicitée également en tous sens par cette armature, et si elle venait à prendre une route particulière, la résistance opposée à son mouvement par les molécules du cristal était évidemment la seule cause à laquelle on pût attribuer ce choix de direction. L'expérience avait lieu dans le vide et dans l'obscurité. Or, voici les résultats que l'on obtient en opérant ainsi.

Si le cristal appartient au système régulier, l'électricité s'épanouit circulairement tout autour de la pointe, et couvre la surface du cercle d'une lueur uniforme. Il en est de même pour les faces parallèles aux bases, dans les systèmes rhomboédrique et quadratique : là encore la conductibilité est égale en tous sens. Dans tous les autres cas, le phénomène est différent : on voit un flux rapide d'électricité s'échapper de la pointe en sens contraires, et tracer un diamètre lumineux d'une orientation déterminée, qui indique la direction de la conductibilité *maxima*.

§ 2. *Propriétés magnétiques.*

Les propriétés magnétiques, en tant qu'elles consistent dans des actions exercées par les minéraux sur l'aiguille aimantée ordinaire, sont restreintes à un bien petit nombre de substances. Les seuls métaux dans lesquels on ait reconnu des traces de ce genre d'action, sont ceux de la famille du fer, c'est-à-dire le fer, le nickel, le cobalt, le chrome et le manganèse; et parmi ces différents corps, il n'y a que le fer qui se rencontre dans la nature à l'état convenable pour agir d'une manière sensible sur l'aiguille aimantée ; les autres ne possèdent la propriété qu'à un degré beaucoup plus faible, et ne la manifestent qu'après avoir été amenés par des préparations chimiques à un très-grand état

de pureté. Le caractère dont il s'agit en ce moment a donc un emploi très-borné en minéralogie : il ne peut servir qu'à faire reconnaître les minerais de fer, ou à constater la présence de ce métal en quantité notable dans les minéraux, où il est disséminé le plus souvent à l'état d'oxyde et de principe colorant.

Il faut distinguer deux sortes d'action que les minéraux peuvent exercer sur l'aiguille aimantée : 1° le *magnétisme simple* : c'est le cas des corps qui agissent par attraction sur l'un et sur l'autre pôle de l'aiguille, comme fait un morceau de fer doux. Ainsi que ce dernier métal, ils prennent passagèrement, sous l'influence de l'aiguille, des pôles qu'ils ne conservent pas, quand on les éloigne de celle-ci. 2° Le *magnétisme polaire* : c'est le cas des substances qui possèdent déjà et par elles-mêmes des pôles, dont l'un agit constamment par attraction, et l'autre par répulsion sur la même extrémité de l'aiguille, et qui, tous deux, attirent et retiennent la limaille de fer, dans laquelle on plonge le minéral. C'est par ces actions répulsives et attractives que se constate la polarité électrique. Pour reconnaître si un minéral est *magnéti-polaire*, il faut présenter successivement au même pôle de l'aiguille les diverses parties de ce minéral, pour trouver un point où il y ait répulsion : si l'on tombe tout d'abord sur une partie qui attire le pôle de l'aiguille, on présentera le minéral par le point diamétralement opposé, et l'on observera une répulsion du même pôle, dans les cas de magnétisme polaire. Pour reconnaître le magnétisme simple, il suffit d'approcher le minéral à essayer d'une aiguille aimantée, et de voir si l'aiguille est dérangée de sa position d'équilibre. Si le minéral est en poussière, on promène sur cette poussière un barreau aimanté, et on la voit s'attacher aux deux extrémités du barreau, comme ferait la limaille de fer en pareil cas.

On ne connaît qu'un petit nombre de minéraux qui possèdent un magnétisme assez prononcé, pour agir ainsi sur l'aiguille aimantée ordinaire. Ces minéraux sont, indépendamment du fer natif ou météorique, le fer aimant ou oxydulé, la pyrite magnétique, le fer titané des volcans, et le fer oligiste. D'autres minerais de fer deviennent magnétiques et agissent sur l'aiguille, après avoir été chauffés à la flamme de désoxydation du chalumeau, parce qu'il se forme alors une des combinaisons précédentes, soit le fer oxydulé, soit la pyrite magnétique. Certains minéraux ferrifères, comme les grenats, certaines roches volcaniques, telles que le basalte, le mélaphyre et la serpentine, sont

pareillement doués du magnétisme, peut-être à cause des éléments ou composés magnétiques qui font partie de leur constitution essentielle, ou qui se rencontrent accidentellement dans leur masse.

Beaucoup d'autres minéraux, sans doute, sont magnétiques par eux-mêmes ou par le fer qu'ils contiennent, mais trop faiblement, pour que leur pouvoir puisse se manifester dans les conditions défavorables où l'on opère. Il ne faut pas perdre de vue que le minéral qu'on éprouve, a à vaincre une résistance qu'oppose au mouvement de l'aiguille la force directrice du globe terrestre. Si l'on annulait cette résistance, on pourrait rendre sensible dans un minéral une quantité de magnétisme trop faible pour se manifester dans les circonstances ordinaires. Haüy avait imaginé pour cela une méthode particulière, à laquelle il donnait le nom de méthode du double magnétisme. Elle consiste à neutraliser la force qui s'oppose au mouvement de rotation de l'aiguille, en plaçant devant elle, dans le plan du méridien magnétique, un barreau aimanté, dont la direction soit sur le prolongement de celle de l'aiguille, et dont les pôles sont renversés par rapport aux siens. On fait avancer doucement le barreau vers l'aiguille, et l'on voit celle-ci tourner dans un sens, et tendre à se placer dans une direction à peu près perpendiculaire au méridien. Lorsqu'elle est arrivée dans cette position, on présente le corps destiné pour l'expérience, près du bord de l'aiguille qui regarde le barreau, vis-à-vis du pôle situé dans la partie qui fait un angle obtus avec la direction du barreau. De cette manière, l'attraction du corps sur le pôle conspire avec la tendance du même pôle à s'approcher du barreau pour continuer son mouvement de rotation. En opérant ainsi, Haüy est parvenu à donner une grande extension au caractère qui se tire de l'action sur l'aiguille aimantée; elle lui a fait reconnaître les effets de cette action dans une multitude de corps où ils paraissaient nuls, quand l'expérience se faisait à la manière ordinaire. On pourrait aujourd'hui substituer avec avantage à cette combinaison de l'aiguille aimantée et du barreau magnétique, une simple aiguille, mais du genre de celles que Ampère a nommées *astatiques*, et sur lesquelles le globe est sans action.

Quand une substance naturelle est douée par elle-même de la faculté d'agir sur l'aiguille aimantée, toutes les variétés de l'espèce sont généralement magnétiques; mais si l'une d'elles pré-

sente le magnétisme polaire, on ne doit pas en conclure que toutes les autres seront dans le même cas : tout au plus on peut dire qu'elles sont capables de l'acquérir. Ainsi, dans l'espèce où la polarité électrique est développée au plus haut degré, dans le fer oxydulé ou l'aimant naturel, ce sont les variétés terreuses, celles où la substance paraît avoir éprouvé un commencement de désaggrégation et d'altération, qui sont magnéti-polaires, tandis que les cristaux ne possèdent le plus souvent que le magnétisme simple. Ceci nous montre qu'il n'en est pas de l'axe magnétique de ce corps comme de l'axe électrique des tourmalines : son développement et sa position ne paraissent dépendre en aucune manière de la structure ni de la forme cristalline du minéral. Tout semble indiquer au contraire que les aimants naturels sont redevables de leurs propriétés particulières à l'action de la terre, qui, comme on le sait, agit elle-même à la façon des aimants, et que, dans la place qu'ils ont occupée primitivement, la ligne des pôles devait correspondre au méridien magnétique du lieu. C'est d'ailleurs ce que l'on a eu occasion d'observer dans les roches de certaines montagnes, dont la masse entière paraît douée de magnétisme.

Quoique les cristaux du fer oxydulé ne soient point en général magnéti-polaires, cependant ils peuvent le devenir dans certaines circonstances, comme cela paraît résulter d'une observation intéressante faite par M. Hugard, aide-naturaliste pour la minéralogie au Muséum d'histoire naturelle. Ce jeune savant a reconnu des pôles dans des cristaux octaèdres venant du Brésil, que possède la collection du Muséum, et qu'on peut rapporter à la martite; ils paraissent en effet avoir été transformés au moins partiellement, par épigénie, en peroxyde de fer, leur poussière étant rouge en certains endroits, et noire encore dans d'autres. L'axe magnétique est sans doute dirigé transversalement par rapport à deux faces opposées, car tous les points de l'une d'elles repoussent un des pôles de l'aiguille aimantée, tandis que ceux de l'autre face attirent ce même pôle.

Il n'a été question dans ce qui précède, que des minéraux capables d'agir sur l'aiguille aimantée ordinaire. Mais les propriétés magnétiques s'étendraient à un bien plus grand nombre de corps, soit naturels soit artificiels, si l'on se servait, pour les soumettre à l'épreuve, d'aimants d'une très-grande puissance, comme ceux que produit aujourd'hui l'électro-magnétisme. Déjà Coulomb avait fait remarquer, longtemps avant la découverte

de ces nouveaux appareils, une sorte d'action magnétique, que paraissaient exercer sur presque tous les corps de la nature, deux forts barreaux aimantés, placés l'un devant l'autre, et se présentant par leurs pôles contraires. Il suspendait entre ces pôles, par un fil sans torsion, de petites aiguilles très-fines des matières qu'il voulait essayer, et ces aiguilles étaient influencées par les aimants : elles se dirigeaient suivant la ligne des pôles, et se mettaient à osciller avec plus ou moins de rapidité. De son côté, Lebaillif avait reconnu l'action exercée par un grand nombre de substances sur un système d'aiguilles magnétiques très-sensible, imaginé par lui, et nommé *sidéroscope ;* et il avait constaté en même temps un fait tout nouveau et d'une grande importance, savoir : la répulsion constante qu'exercent sur cet appareil certains métaux, tels que le bismuth et l'antimoine.

Plus récemment, M. Delesse a montré que beaucoup de minéraux et de roches, autres que ceux qui contiennent du fer, sont magnétiques, ce que l'on reconnaît en les suspendant librement entre les deux pôles d'un électro-aimant très-énergique, en forme de fer-à-cheval; et il a fait voir aussi que toute substance magnétique peut devenir magnéti-polaire, si on la met en contact avec les extrémités du fer-à-cheval, et mieux encore, si l'on ajoute aux deux branches des pièces polaires ou armatures en fer doux, que l'on rapproche jusqu'à ce qu'elles se touchent, pour appliquer ensuite la substance magnétique à leur point de contact mutuel : dans ce dernier cas, l'aimantation est plus facile, et beaucoup plus énergique. M. Delesse a examiné avec soin un très-grand nombre de substances, et il a déterminé le *pouvoir magnétique* de chacune d'elles, par la quantité de sa poussière, que l'un des pôles de l'aimant était capable de supporter (1).

On doit à M. Faraday une découverte importante, qui confirme et généralise les faits, antérieurement observés par Coulomb et Lebaillif. Il a reconnu que toute substance est sensible à l'action magnétique, quand elle est placée entre les pôles d'un électro-aimant très-puissant; et que cette action magnétique s'exerce de deux manières, tantôt comme une force attractive, et tantôt comme une force répulsive. Des aiguilles minces de ces diverses substances, ou de petits tubes remplis de leur pous-

(1) Delesse : *Sur le magnétisme polaire des minéraux et des roches*; (*Annales de Chimie et de Physique*, tome XXV, 1849; et *Annales des Mines*, 4e série, tome XIV, p. 429, et XV, p. 479).

sière, étant librement suspendus par leur milieu, sont tantôt attirés par les pôles de l'aimant, et tendent alors à se diriger suivant la ligne des pôles, ou bien ils sont repoussés par eux, et se dirigent perpendiculairement à l'axe magnétique. D'après cela, on peut distinguer deux classes de substances magnétiques : 1° les substances *magnétiques* proprement dites (ou mieux, les substances *para-magnétiques); ce* sont celles qui prennent une direction parallèle à l'axe (ou axiale) ; et 2° les *dia-magnétiques* : ce sont les substances qui prennent une direction transverse (ou *équatoriale*). Parmi les substances para-magnétiques, nous citerons le fer, le nickel, le cobalt, le manganèse, le platine, l'oxyde d'étain, l'idocrase, la tourmaline, le pyroxène, etc. Parmi les dia-magnétiques, le soufre, l'arsenic, le bismuth, l'antimoine, le zinc, le plomb, l'or, le quarz, le calcaire spathique, la glace, le gypse, le zircon, la topaze, etc. Le disthène est, selon ses diverses variétés, tantôt para-magnétique, et tantôt dia-magnétique ; et M. Plücker a remarqué qu'une aiguille de ce minéral tendait à se diriger d'elle-même, c'est-à-dire par la seule action du magnétisme de la terre.

Cette différence d'action que l'on observe entre l'électro-aimant et les diverses substances naturelles, paraît dépendre beaucoup plus du milieu dans lequel se trouve la substance essayée que de cette substance elle-même. Certain corps qui est para-magnétique à la température ordinaire, devient dia-magnétique à une température plus élevée ; et tel autre, qui est para-magnétique dans le vide, peut devenir dia-magnétique, s'il est plongé dans l'air ou dans l'eau. Suivant M. Ed. Becquerel, l'aimant n'exercerait qu'une seule espèce d'action sur tous les corps soumis à son influence; et il attribue la répulsion qu'il semble exercer dans certains cas, à ce que le corps serait plongé dans un milieu *plus magnétique* que lui, basant ainsi l'explication de cette anomalie apparente, sur une sorte d'extension qu'il croit pouvoir donner au principe d'Archimède. M. Plücker, de son côté, a recours au même principe, tout en admettant avec M. Faraday l'existence de corps magnétiques de deux natures différentes.

Il paraît résulter d'expériences nombreuses faites par MM. Plücker et Beer, Knoblauch et Tyndall, que dans les substances cristallisées, qui n'appartiennent pas au premier système cristallin, les axes cristallographiques exercent une certaine influence sur le développement de la polarité magnétique. Il y a, dans les

cristau ...s cinq derniers systèmes, de certaines directions qui s ...s ou repoussées par l'électro-aimant avec plus de force ... les autres, et qui deviennent ainsi des axes magnéti... ces cristaux. Ceux-ci, en effet, tendent à se diriger, ... ôles de l'aimant, d'une manière qui leur est propre, ... dante de la forme artificielle qu'on a pu leur donner; et ... annuler l'influence de cette forme on la rend sphé... voit le corps cristallisé se tourner de façon à placer ... gne des pôles ou dans une direction perpendiculaire, ... nes fondamentales de sa structure (1).

(1) ... tomes LXXVI, LXXVII et LXXVIII. B ... p. 233).

III. CARACTÈRES EXTÉRIEURS.

Il ne nous reste plus à parler que de quelques caractères, tirés des qualités que nous pouvons saisir dans les minéraux à l'aide des seuls organes des sens, et qui s'offrent d'eux-mêmes à l'observation, sans nécessiter aucune mesure ni aucune expérience. Ce sont les caractères extérieurs proprement dits, ceux qui déterminent plus particulièrement, par leur ensemble, ce qu'on appelle le *facies* d'un minéral, et qui sont les plus propres à donner une idée de son apparence, à ceux qui ne le connaissent pas encore, ou à le rappeler à l'esprit de ceux qui l'ont déjà vu et observé avec attention. Tels sont la transparence, l'éclat, la couleur, et généralement tous les caractères qu'on a appelés *organoleptiques*, et qui proviennent des diverses impressions faites sur nos sens. A ceux-ci, les minéralogistes de l'école de Werner réunissaient encore, sous le nom de caractères extérieurs, la plupart de ceux que nous avons étudiés jusqu'ici, savoir : la forme, la structure, la cassure, la solidité ou la cohésion, la dureté, la pesanteur : mais ils se bornaient dans ce cas à une appréciation vague de ces caractères, jugeant de la forme et de la structure par la vue seulement, et de la pesanteur, par la sensation que le corps fait éprouver à la main ; déterminant la dureté, la solidité et la cassure, à l'aide d'instruments, il est vrai, mais des instruments les plus vulgaires, de ceux qu'on a toujours à sa portée, comme un couteau ou un marteau. Werner est l'auteur d'un Traité des caractères extérieurs, dans lequel il s'est efforcé de ramener à des procédés méthodiques, la description des minéraux, et leur détermination empirique ; il est parvenu à définir ces caractères avec une clarté et une exactitude vraiment remarquables. Ses propres disciples n'ont pas tardé à reconnaître eux-mêmes l'insuffisance de pareils moyens de détermination ; mais, dans la réaction qui s'est

opérée contre les principes de l'école wernérienne, on a trop méconnu peut-être les services qu'elle avait rendus à la science; on a perdu de vue l'utilité dont peuvent être des caractères définis avec ce soin et cette précision qui étaient propres au célèbre minéralogiste; ils ont une importance réelle, lorsqu'il s'agit, non de déterminer rigoureusement une espèce, mais de la décrire, de manière à faciliter les moyens de la reconnaître.

Nous ne reviendrons pas ici sur ceux des caractères extérieurs qui ont déjà été étudiés dans les chapitres précédents. Nous ne parlerons que de ceux que nous avons désignés ci-dessus par le nom de caractères extérieurs proprement dits, et qui dérivent des propriétés organoleptiques.

CHAPITRE XIII.

PROPRIÉTÉS DÉPENDANTES DE L'ACTION DES MINÉRAUX SUR LES SENS.

§ 1. *Actions sur l'organe de la vue.*

Il est des effets que produit directement sur l'organe de la vue, la lumière qui vient de traverser un corps, ou qui s'est réfléchie à sa surface : tels sont ceux que l'on distingue par les dénominations de *couleur* et d'*éclat*, comme aussi les diverses apparences qui résultent de la transmission plus ou moins parfaite de la lumière au travers de la masse, et qu'on désigne par les mots de transparence, de translucidité et d'opacité.

1° *De la transparence.* — Cette propriété peut offrir des degrés d'intensité, depuis la transparence la plus parfaite jusqu'à l'opacité entière. On dit qu'un minéral est complètement *transparent*, lorsque la lumière qui le pénètre est assez abondante et passe assez librement, pour permettre à l'œil de distinguer nettement un objet à travers l'épaisseur du corps (exemples : le spath d'Islande et le cristal de roche). Il est *demi-transparent*, lorsqu'il ne laisse voir les objets que d'une manière un peu confuse; *translucide*, lorsqu'on ne peut rien distinguer, même confusément (l'agate chalcédoine); *opaque*, lorsqu'il ne laisse passer aucun rayon de lumière (le jaspe). Il est des substances qui paraissent opaques, lorsqu'elles ont une certaine épaisseur, et qui

deviennent transparentes, lorsqu'on les réduit en lames minces, ou qui se montrent translucides vers les bords minces des fragments. Dans ce dernier cas, on dit qu'elles sont *translucides sur les bords* (le silex pyromaque).

Il est bien peu de substances qui ne soient transparentes, lorsqu'elles sont chimiquement pures, de structure homogène, et d'un faible volume. Mais l'absence d'une ou de plusieurs de ces conditions, et quelques autres circonstances encore, peuvent altérer cette propriété à divers degrés, et produire même l'opacité complète. Les principales causes de l'opacité dans les corps sont : l'intensité de la couleur réfléchie et la vivacité de l'éclat qui l'accompagne ; l'accroissement de l'épaisseur ; l'hétérogénéité de structure et de composition. Lorsque le minéral n'est pas uniforme dans sa structure, lorsque sa masse est poreuse, ou composée de particules de densités très-différentes, la lumière est entravée dans sa marche par les réflexions et absorptions répétées, qui ont lieu au passage des parties denses à celles qui le sont moins. C'est ainsi que par la perte de l'eau qu'elles contiennent habituellement, et qui n'est qu'interposée entre les particules siliceuses, les opales et les agates deviennent opaques, parce que des pores vides ou remplis d'air ont remplacé les parties aqueuses. Par une raison toute contraire, certaines opales que l'on rencontre dans la nature à cet état d'altération qui les a rendues opaques, reprennent de la transparence, lorsqu'on les laisse s'imbiber de ce liquide : on voit l'eau les pénétrer et se substituer à l'air qui sort de la pierre sous forme de bulles ; et comme l'eau a une densité qui se rapproche beaucoup plus de celle de la silice, l'hétérogénéité est moins grande sous ce rapport, et l'opacité se trouve par là diminuée. C'est le cas de l'*hydrophane*, variété d'opale commune, qui est habituellement opaque, et qui, plongée dans l'eau, devient translucide. Les anciens minéralogistes voyaient dans ce fait une sorte de merveille, ne comprenant pas comment le déplacement de l'air, par un corps moins transparent que lui, pouvait accroître la transparence de la pierre ; c'était pour eux un phénomène inexplicable ; aussi ont-ils beaucoup vanté cette pierre, à laquelle ils donnaient le nom pompeux d'*œil du monde*. Tout le merveilleux a disparu devant l'explication physique d'un fait qui, aujourd'hui, nous semble des plus simples.

2° *De l'éclat.* — Les minéraux manifestent beaucoup de différence entre eux, relativement à la manière dont la lumière se

comporte à leur surface ; et nous avons déjà dit que, sous ce rapport, il y avait lieu de distinguer deux effets différents, l'éclat et la couleur, qui sont l'un à l'autre ce qu'est le timbre au ton dans un instrument de musique. La couleur ne dépend que de la nature des rayons réfléchis : l'éclat tient à leur intensité, et à certaines modifications particulières de leur teinte qu'on ne saurait définir ; il dépend de la structure du corps, du mode de texture, et du plus ou moins de poli de sa surface. L'éclat en général est, comme la transparence et la couleur, susceptible de gradation : il est plus ou moins vif, plus ou moins terne, et disparaît entièrement dans les variétés dont l'aspect devient mat, lithoïde ou terreux.

On distingue plusieurs sortes d'éclat dans les minéraux :

a. L'éclat *métallique*, qui est propre aux substances métalliques (métaux natifs ou alliés ; métaux sulfurés et oxydés), et qui se trouve presque toujours lié à une grande opacité ; il peut être plus ou moins intense, ou plus ou moins parfait.

b. L'éclat *métalloïde,* qui est une fausse apparence métallique, offerte par certaines substances combustibles ou pierreuses, et qui n'est que superficielle, disparaissant presque aussitôt qu'on vient à rayer la surface, pour faire place à une couleur blanche ou grise. Exemples : certaines variétés d'anthracite, de mica, de diallage. Ce genre d'éclat se rapproche de celui qu'on désigne par le nom de *nacré.*

c. L'éclat *adamantin*, intermédiaire entre l'éclat métallique et l'éclat vitreux. C'est celui qui est propre à certains cristaux d'un grand pouvoir réfringent, comme ceux de diamant, de zircon, de carbonate de plomb, etc., dont les faces perdent leur aspect vitreux pour prendre une apparence métallique, lorsqu'on les incline convenablement par rapport à l'œil.

d. L'éclat *nacré*, ou *perlé*, semblable à celui de la nacre de perles, et qui est comme un mélange de l'éclat argentin avec l'éclat vitreux. Il paraît être occasionné par des fissures planes et ne se montre que sur certaines faces d'un cristal, sur celles qui répondent à un clivage très-facile, ou à une structure d'agrégation lamellaire. Il est souvent parallèle à la base des cristaux prismatiques, surtout dans ceux qui ont un axe principal. Exemples : le calcaire spathique, l'apophyllite, le corindon, les micas, les stilbites, le gypse laminaire.

e. L'éclat *soyeux*, qui ressemble à celui des étoffes moirées, et résulte d'une structure composée de fibres droites, très-

rées et d'égale grosseur. Exemples : le gypse, le calcaire fi-
reux.

f. L'éclat *gras*, qui se présente dans certaines pierres à cas-
re vitreuse, dont la surface semble avoir été frottée d'huile.
emples : le quarz gras, l'éléolithe.

g. L'éclat *résineux*, qui tient en quelque sorte le milieu entre
clat gras et l'éclat vitreux. Exemples : l'opale, l'asphalte.

h. L'éclat *vitreux*, analogue à celui du verre, et qui se ren-
ntre dans un grand nombre de cristaux dont le pouvoir ré-
ngent est peu considérable.

3° *De la couleur.* — Les minéraux sont incolores ou colorés.
s minéraux incolores et transparents ont la limpidité de l'eau
re ; l'incoloration, jointe à l'opacité, constitue la blancheur.
ns le cas où la couleur est jointe à la transparence, elle peut
e due, soit à la lumière transmise ou réfractée (*couleur ré-
ctée*), soit à la lumière qui a été réfléchie par la surface (*cou-
r réfléchie*). C'est de cette dernière seulement qu'il sera ques-
n ici, parce que nous avons traité ailleurs des couleurs pro-
ites par la lumière transmise au travers des cristaux trans-
rents.

On étudie séparément dans les minéraux la couleur de la
asse, et celle de la poussière, parce que cette dernière n'est pas
ujours de même nature que la première, et parce que celle-ci
t toujours plus ou moins modifiée par l'intensité de l'éclat, ou
r l'état d'aggrégation de la masse. Pour déterminer la couleur
la poussière, on racle le minéral avec la pointe d'un cou-
au, ou bien on frotte une plaque dure et blanche faite en bis-
it de porcelaine, avec une des parties aiguës du minéral, et
n observe la nuance de la raie ainsi produite (der Strich) ; on
ut encore pulvériser le minéral dans un mortier, et en étaler
 poudre sur un papier blanc.

Les couleurs qu'on observe dans un minéral sont de deux
rres très-différents, qu'il faut éviter de confondre l'un avec
utre : les minéraux peuvent être en effet colorés par eux-
êmes, et alors on dit qu'ils ont une couleur *propre* ; ou bien,
s sont colorés accidentellement par le mélange de leurs molé-
les avec des particules étrangères, appartenant à des corps
lorés par eux-mêmes, et faisant fonction de matière colorante
l'égard des premiers ; dans ce cas, la couleur est dite *acciden-
lle*. Les couleurs accidentelles pouvant varier à l'infini dans
a même espèce, elles ne sauraient avoir l'importance des cou-

leurs propres, et on ne peut en tirer que des caractères de simples variétés. Les couleurs propres, au contraire, fournissent des caractères spécifiques, c'est-à-dire des caractères qui servent à la distinction des espèces minérales; car elles sont constantes et uniformes dans toute la masse, si la substance est à l'état de pureté parfaite. Elles peuvent cependant varier d'intensité et de nuance, selon le mode d'aggrégation des particules, et le degré de leur condensation dans la masse; mais on les retrouve les mêmes dans les diverses variétés d'une même espèce, si l'on a soin de ramener celles-ci dans les mêmes conditions physiques, ce que l'on fait en les réduisant toutes en poussière fine, avant d'observer le caractère de leur teinte.

Les substances naturelles qui possèdent des couleurs propres sont : parmi les corps simples, le soufre et la plupart des métaux; parmi les composés binaires, les sulfures et les arséniures métalliques, les chlorures et oxydes des métaux proprement dits (ou métaux lourds). Les corps d'une composition plus complexe, comme les sels simples ou doubles, sont incolores, lorsque les acides et les bases dont ils sont formés, ont pour radicaux, les premiers, des éléments non métalliques, et les secondes, des métaux légers (métaux des alcalis et des terres); ils sont en général colorés par eux-mêmes, lorsque ces acides et ces bases sont des oxydes de métaux proprement dits, qui, ayant une couleur propre, font l'office de principe colorant dans la combinaison. Aussi, la plus grande partie des minéraux pierreux, étant des sels à bases terreuses ou alcalines, se montrent dépourvus de toute couleur, lorsqu'ils sont purs et sans mélange; mais viennent-ils à former des mélanges isomorphiques, ou des combinaisons indéfinies avec les particules colorantes de sels à bases métalliques, ces minéraux se montrent alors colorés par ces mélanges accidentels, et par conséquent d'une manière variable. Les couleurs accidentelles sont donc dues à la présence de particules étrangères à celles qui constituent l'espèce : elles ne sont point constantes, et rarement même elles sont uniformes dans une seule masse, dès que son volume est tant soit peu considérable.

Il serait utile que les physiciens nous donnassent les moyens de ramener à des types bien définis, les couleurs propres des corps naturels, de fixer leur nomenclature, et de déterminer plus rigoureusement qu'on ne l'a fait jusqu'à présent, le ton particulier de chacune d'elles. M. Chevreul, qui depuis longtemps

s'occupe de cette question importante, ne tardera pas à publier les résultats de ses recherches, attendus avec impatience. On s'est contenté jusqu'ici, comme on le fait dans la vie commune, d'admettre la distinction d'un certain nombre de couleurs principales parmi celles que nous offrent les minéraux, de rapporter à un même genre toutes celles qui se rapprochent à un certain point les unes des autres, de donner à chaque espèce une dénomination particulière, jointe au nom de genre de la couleur principale; pour cela, on a puisé, dans l'observation journalière et dans le langage reçu, tout ce que semblaient exiger les besoins de la science et de la nomenclature. Tantôt on a rapporté la couleur à un terme de comparaison pris parmi des objets familiers, comme quand on a dit *bleu de ciel*, *jaune de citron;* tantôt on a combiné les noms des deux couleurs, dont celle que l'on considère paraît participer, et l'on a dit, par exemple, *jaune-verdâtre*, ou *vert-jaunâtre*, en plaçant le premier le nom de la couleur dominante.

Werner, qui a cherché à donner des règles à cette nomenclature, distinguait huit couleurs principales, savoir : le *blanc*, le *gris*, le *noir*, le *bleu*, le *vert*, le *jaune*, le *rouge* et le *brun;* et dans chacune d'elles un certain nombre de variétés, produites pour la plupart par le mélange de la couleur principale avec les autres couleurs. Voici, d'après lui, le tableau complet de ces variétés, tant pour les couleurs des substances métalliques, que pour celles des substances pierreuses.

A. *Couleurs métalliques.* Rouge de cuivre, brun de tombac, jaune de bronze, jaune de laiton, jaune d'or, blanc d'argent, blanc d'étain, gris de plomb, gris d'acier.

B. *Couleurs non métalliques.*

a. Le *blanc.* Variétés : le blanc de neige, le blanc-rougeâtre, le blanc-jaunâtre, le blanc-verdâtre, le blanc-bleuâtre, le blanc-grisâtre.

b. Le *gris.* Variétés : le gris de cendre, le gris-verdâtre, le gris-bleuâtre, le gris-rougeâtre, le gris-jaunâtre, le gris de fumée, le gris-noirâtre.

c. Le *noir.* Variétés : le noir-grisâtre, le noir de velours, le noir-brunâtre, le noir-rougeâtre, le noir-verdâtre, le noir-bleuâtre.

d. Le *bleu.* Variétés : le bleu-noirâtre, le bleu d'azur, le bleu-violet, le bleu de lavande, le bleu de prusse, le bleu de smalt, le bleu d'indigo, le bleu de ciel.

e. Le *vert*. Variétés : le vert de gris, le vert céladon, le vert de montagne, le vert de poireau, le vert d'émeraude, le vert pomme, le vert de pistache, le vert-noirâtre, le vert d'olive, le vert d'herbe, le vert d'asperge, le vert d'huile, le vert de serin.

f. Le *jaune*. Variétés : le jaune de soufre; le jaune de paille, le jaune de cire, le jaune de miel, le jaune de citron, le jaune d'ocre, le jaune de vin, le jaune-isabelle, le jaune-orangé.

g. Le *rouge*. Variétés : le rouge aurore, le rouge hyacinthe, le rouge de brique, le rouge écarlate, le rouge de sang, le rouge de chair, le rouge de carmin, le rouge de cochenille, le rouge de rose, le rouge fleur de pêcher, le rouge de cerise, le rouge-brunâtre.

h. Le *brun*. Variétés : le brun-rougeâtre, le brun de girofle, le brun de châtaigne, le brun-jaunâtre, le brun de foie, le brun-noirâtre.

Les couleurs accidentelles des minéraux sont fixes ou changeantes. Les couleurs fixes sont dues à ces mélanges de particules étrangères avec celles du minéral, dont il a été question précédemment. Les couleurs changeantes sont celles qui changent de nuance, et peuvent passer par toutes celles du prisme, selon la position de l'observateur ou l'aspect sous lequel il voit le minéral. Si le changement se rapporte plus à l'éclat qu'à la couleur, si le minéral ne fait que renvoyer à l'œil des reflets mobiles, blanchâtres ou d'une autre teinte particulière, qui semblent flotter dans son intérieur à mesure qu'on change sa position, on dit que le minéral est *chatoyant* (exemples : le quarz œil de chat; le feldspath pierre de lune). Ce phénomène est dû à des réflexions intérieures qui se font sur des systèmes de lamelles ou de fibres, et rentre dans celui que nous avons étudié sous le nom d'astérie. Mais lorsqu'il sort de la surface du minéral ou de son intérieur, des reflets diversement colorés, dont l'effet est semblable à celui de l'iris ou de l'arc-en-ciel, on dit alors qu'il est *irisé*. Dans ce cas, le changement de couleur ne tient ni à la nature du corps, ni à celle des substances qui s'y trouvent mêlées; il est dû à des accidents de composition ou de structure, produits le plus souvent par un commencement d'altération du minéral. Ces couleurs irisées sont ou superficielles, ou intérieures : dans tous les cas elles s'expliquent par des interférences, et peuvent être rapportées à l'une ou à l'autre des causes qui produisent en physique, soit le phénomène des réseaux, soit celui des anneaux colorés de Newton.

Les fissures ou lames minces qui existent à l'intérieur des corps lamelleux ou d'un clivage facile, comme le gypse et le mica, et qui sont vides ou remplies d'une matière très-peu réfringente, donnent lieu tantôt à des anneaux colorés, plus ou moins irréguliers, tantôt à des franges irisées, comme dans le phénomène des lames minces non cristallisées; les fentes étroites et linéaires, ou les petits espaces vacuolaires, que présente la masse de certains aggrégats cristallins, à structure fibreuse ou grenue, donnent lieu à des phénomènes de coloration, analogues à celui des réseaux. Dans le gypse laminaire, on produit à volonté des couleurs, en essayant de séparer deux lames, de façon qu'il se glisse entre elles une légère couche d'air, que l'on comprime ensuite par la pression des doigts. Le fer oligiste de l'île d'Elbe et de Framont, et le cuivre pyriteux, sont souvent irisés à leur surface, par suite d'une légère pellicule qui s'y est formée, et qui est due à un commencement d'épigénie. Les blocs ou galets de feldspath labrador, qui ont été longtemps exposés aux intempéries de l'air, se font remarquer par de belles couleurs irisées, qui se détachent comme par plaques sur un fond gris, et qui semblent partir de fissures ou de lamelles parallèles à l'une des directions de clivage. Dans l'opale des lapidaires, les jeux de couleur ne sont pas dus à des fissures étendues, mais à des vides capillaires, qui alternent avec des parties pleines, d'égale petitesse : c'est un phénomène de réseau, qui résulte d'une véritable structure vacuolaire, et qui subsiste jusque dans les plus petits fragments, après qu'on a brisé la pierre.

Parmi les jeux de lumière accidentels, on doit placer celui que l'on désigne par le nom d'*aventurine*, et que présentent certaines variétés du quarz grenu ou de feldspath laminaire, dans lesquelles de petites parcelles de quarz vitreux, de petites lamelles de mica ou de fer oligiste, uniformément disséminées, forment une multitude de points brillants dont la pierre est comme parsemée. C'est ce que l'on voit dans la *pierre du soleil* ou l'aventurine orientale, variété de feldspath oligoclase, à fond d'un jaune d'or parsemé de points rougeâtres; dans l'aventurine verte, sous-variété du feldspath dit *pierre des amazones*, qui est parsemée de points blancs sur un fond vert; et enfin dans l'aventurine commune, variété de quarz brun et opaque, au milieu de laquelle sont des points scintillants, produits par des parcelles de quarz vitreux, ou des lamelles de mica. On a donné à ces variétés le nom d'*aventurine naturelle*, parce qu'elles offrent

une imitation, souvent très-imparfaite, de l'aventurine artificielle, qui n'est qu'une sorte de verre coloré et aventuriné par de petits cristaux octaédriques de cuivre métallique. Ces cristaux se sont formés au milieu de la pâte vitreuse, lorsqu'elle était encore en fusion; cette pâte contenait de l'oxyde de cuivre, auquel on avait ajouté une matière charbonneuse, propre à en opérer la réduction. On prétend qu'un ouvrier de la célèbre verrerie de Murano, à Venise, ayant laissé tomber par hasard, ou comme on dit, par aventure, une portion d'oxyde ainsi mélangé, dans du verre en fusion, fut agréablement surpris du résultat qu'il obtint par le refroidissement, et auquel on a donné le nom d'aventurine. Ce produit de l'art est incomparablement plus brillant que l'aventurine naturelle. En l'examinant au microscope, on voit qu'il est formé d'une multitude innombrable de petits cristaux opaques, qui sont des octaèdres entiers à faces triangulaires équilatérales, ou des segments d'octaèdres, à faces hexagonales régulières.

§ 2. *De quelques autres caractères organoleptiques.*

Indépendamment des actions que les minéraux exercent sur l'organe de la vue, ils peuvent produire encore sur nos autres sens des impressions diverses, dont on peut se servir, comme de caractères empiriques, pour reconnaître certaines espèces. Nous ne dirons rien de l'action qu'ils peuvent exercer sur l'organe de l'ouïe : la sonorité est une propriété trop rare dans les minéraux, pour qu'on puisse en tirer un parti avantageux. L'impression que les minéraux peuvent produire sur le toucher a plus d'importance. On distingue des corps *onctueux*, qui font sur la main l'effet d'un corps gras, comme la stéatite; des corps *doux*, comme l'asbeste flexible; et des corps *âpres au toucher*, comme la pierre ponce. Le *happement à la langue*, ou l'adhérence que certains corps poreux contractent avec cet organe, provient de l'attraction capillaire exercée par ces corps sur l'humidité de la langue : certains silex, certaines argiles happent à la langue avec assez de force, pour qu'on éprouve de la résistance, lorsqu'on veut les en séparer, et souvent ils y laissent une portion de leur matière.

Les minéraux diffèrent encore entre eux par leur conductibilité et leur capacité pour la chaleur. De là les diverses variations de froid ou de chaleur que l'on éprouve en touchant un

minéral. Il est difficile de confondre le cristal de roche avec le verre taillé, parce que le premier produit sur la main une impression de froid très-marquée, tandis que l'autre ne produit aucun effet sensible.

Enfin, on peut encore citer comme caractères propres à distinguer certains minéraux, les odeurs et les saveurs particulières qu'ils possèdent. Parmi les odeurs, il en est qui sont propres aux minéraux qui les présentent, et d'autres qui sont dues à des principes accidentels. Ces odeurs peuvent être développées par trois moyens : par l'insufflation de l'haleine sur la surface du corps (odeur argileuse des minéraux terreux); par le frottement (odeur fétide de certains calcaires); par l'action du feu (odeur d'ail des minerais arsénifères).

La saveur n'appartient qu'aux substances minérales solubles connues sous le nom de sels. On peut distinguer en général la saveur *salée* (le sel marin), la saveur *acide* (acide sulfurique), la saveur *piquante* (le sel ammoniac), la saveur *fraîche* (le nitre), la saveur *astringente* (l'alun), la saveur *amère* (le sulfate de magnésie), la saveur *caustique* (le carbonate de soude), la saveur *douce* (le borax).

LIVRE SECOND.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DES MINÉRAUX.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES MINÉRAUX, ET DES MOYENS DE LA FORMULER.

Nous avons vu que le caractère essentiel des espèces minérales réside dans leur molécule physique, laquelle s'identifie avec la molécule chimique, ou bien en est un multiple. C'est donc, avant tout, de la différence des molécules chimiques que dérive celle des minéraux eux-mêmes. Or, à quoi peut tenir la diversité de ces dernières molécules? elle provient en général de ce qu'elles ont une composition élémentaire différente, que l'observation nous fait reconnaître. Cette composition peut être considérée et étudiée sous trois rapports : 1° sous le rapport de la nature ou qualité particulière des éléments ou atomes composants, et de là résulte ce que l'on appelle la *composition chimique qualitative* ; 2° sous le rapport des quantités relatives de ces mêmes éléments (*composition quantitative*); 3° sous le rapport du type spécial de la combinaison, résultant du nombre réel et de la position respective de chaque sorte d'atomes; ces deux conditions déterminant nécessairement un type moléculaire, qui a sa forme et sa structure propres : c'est ce que nous désignerons par le nom de *composition typique*.

§ 1. *Composition qualitative.*

En soumettant aux divers agents de la chimie tous les minéraux connus, les chimistes en ont retiré par l'analyse une soixan-

taine de substances différentes que, dans l'état actuel de la science, ils considèrent comme autant de corps simples, et qui sont pour le naturaliste les éléments du règne inorganique. Ces éléments se partagent d'abord en deux classes : les éléments non métalliques (ou les *gazolytes*), et les éléments métalliques (ou les *métaux*). Les premiers sont au nombre de treize : l'hydrogène, l'oxygène, le soufre, le sélénium, le chlore, le fluor, l'iode, le brôme, l'azote, le phosphore, le carbone, le bore et le silicium. On y ajoute quelquefois l'arsenic et le tellure, qui ont une apparence semi-métallique. Ces corps ne forment point de bases salifiables en se combinant avec l'oxygène; en s'unissant à l'oxygène ou à l'hydrogène, ils produisent souvent des combinaisons gazeuses, neutres ou acides.

Les corps simples métalliques, ou les métaux, ont pour caractères d'être généralement opaques, doués de l'éclat métallique, et plus ou moins bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité. Tous sont solides à la température ordinaire (le mercure excepté). Ils se subdivisent assez naturellement en deux groupes, dont l'un comprend les *métaux légers* (métaux hétéropsides de Haüy), qui, à raison de leur grande affinité pour l'oxygène, ne s'offrent jamais d'eux-mêmes avec le brillant métallique, dont les oxydes sont difficiles à réduire, et qui ne peuvent être maintenus qu'avec peine à l'état de métal. Ces métaux ont une densité au-dessous de cinq, et pour le plus grand nombre même inférieure à un. L'autre groupe comprend les *métaux lourds* ou *métaux proprement dits* (métaux autopsides de Haüy), qui ont une pesanteur spécifique au-dessus de cinq, et souvent même bien supérieure à ce nombre, dont les oxydes sont plus ou moins facilement réductibles par la chaleur seule, ou avec le secours du charbon; qui peuvent prendre un beau poli et un vif éclat, enfin, qui se présentent à l'état métallique dans la nature, ou peuvent être facilement ramenés à cet état. Ils sont connus depuis longtemps pour la plupart, et ce sont les seuls qu'on puisse employer dans les arts et dans l'industrie.

Parmi les métaux légers, on distingue les métaux alcalins, savoir : le potassium, le sodium, le lithium, le baryum, le strontium et le calcium; et les métaux terreux, qui sont : le magnésium, l'yttrium, le glucium, l'aluminium, le silicium, le zirconium et le lanthane.

Les métaux lourds sont : le thorium, le titane, le tantale, le tungstène, le molybdène, le vanadium, le chrôme, le manga-

nèse, l'urane, le cérium, l'arsenic, l'antimoine, le tellure, le bismuth, le zinc, le cadmium, l'étain, le plomb, le fer, le cobalt, le nickel, le cuivre, l'argent, le mercure, l'or, le platine, le palladium, le rhodium, l'iridium et l'osmium, auxquels il faut ajouter quelques métaux récemment découverts, et encore peu connus : le didymium, l'erbium, le terbium, le niobium et le pelopium.

Nous venons de nommer tous les éléments dont se composent les minéraux, et auxquels on est toujours ramené par l'analyse chimique. Ils ne se présentent pas toujours combinés les uns avec les autres. Il en est qui constituent à eux seuls des minéraux, et ceux-ci par conséquent les offrent à l'état libre, ou, comme on dit en minéralogie, à l'état natif. Mais le plus souvent on les trouve combinés entre eux, parce que, dans le nombre, il s'en trouve quelques-uns qui ont une grande tendance à s'unir avec les autres pour former ce qu'on nomme des *composés binaires*. Ces principes éminemment actifs sont appelés des principes minéralisateurs, ou des éléments électro-négatifs; et l'on donne le nom de bases, de radicaux ou d'éléments électro-positifs aux autres éléments avec lesquels on les trouve presque toujours combinés. Les éléments minéralisateurs ou électro-négatifs, sont : l'oxygène, le soufre, l'arsenic, le tellure, le chlore, le fluor, etc. Les composés binaires, formés par l'oxygène, et qu'on nomme oxydes, sont les plus nombreux : et ils se partagent de même en deux séries : les *acides* ou composés électro-négatifs, et les *bases*, ou composés électro-positifs. Les premiers n'ont presque point de tendance à se combiner entre eux, mais ils ont la propriété de s'unir avec les bases, pour former avec elles des composés ternaires, appelés *sels* (oxy-sels). Il en est de même des composés binaires, auxquels le soufre donne naissance, et qu'on nomme *sulfures* : parmi eux, on distingue un petit nombre de sulfures acides (ou sulfides) et de sulfures basiques (ou sulfures proprement dits); et de l'union des premiers avec les seconds, résultent encore des combinaisons ternaires, appelées *sulfo-sels*. Il existe aussi des combinaisons d'un ordre encore plus élevé, comme celles qui résultent de l'union d'un sel avec l'eau (sels hydratés), ou d'un sel avec un autre sel (sels doubles).

§ 2. *Composition quantitative.*

Nous avons dit ailleurs qu'on appelait *atomes*, les plus petites parties matérielles dans lesquelles les minéraux peuvent être divisés par les décompositions chimiques, en sorte qu'il y a autant d'espèces différentes d'atomes, qu'il y a de corps réellement simples ou au moins indécomposés. Les atomes de même espèce ou d'espèces différentes se groupent ou se combinent entre eux en diverses proportions et de diverses manières pour former ces autres particules de la matière, que nous avons appelées *molécules*, et qui, malgré leur état plus complexe, échappent à nos sens par leur petitesse extrême, aussi bien que les atomes simples. Toute molécule d'un composé minéral est une combinaison d'atomes simples, dans laquelle chaque atome d'une espèce entre pour un nombre fixe; et la combinaison est définie, quand on fait connaître les nombres relatifs d'atomes de chaque espèce que renferme un atome du composé. Tout cela est la conséquence des lois d'observation, qui régissent les combinaisons minérales, et que nous allons faire connaître ou du moins rappeler en peu de mots.

Ces lois sont au nombre de quatre :

1° La *loi des proportions définies.* — Pour chaque espèce de corps, les proportions relatives des éléments sont déterminées et constantes : elles n'admettent point de variation, ni par sauts brusques, ni par nuances intermédiaires; et celles qu'on a reconnues dans une variété du minéral, se retrouvent dans toutes les autres, pourvu qu'elles soient également pures.

2° La *loi des proportions multiples.* — Il arrive souvent qu'un corps peut s'unir, dans des circonstances différentes, avec un autre corps, en deux, trois, ou un plus grand nombre de proportions. Si l'on prend le second corps toujours en même quantité pondérale, et que l'on compare entre elles les proportions de l'autre corps, on trouve qu'elles sont des multiples ou sous-multiples simples les unes des autres, en sorte qu'il suffit d'en connaître une seule, pour pouvoir en déduire toutes les autres.

3° La *loi des équivalents* ou des *proportions normales.* — Quand on connaît les poids de différents corps, qui peuvent s'unir à un seul et même poids d'un autre corps, par exemple avec cent parties d'oxygène, on connaît par cela même les proportions pondérales dans lesquelles ils se combineraient entre eux. Ces

quantités de poids relatives et déterminées, suivant lesquelles se font de préférence toutes les combinaisons, se nomment *équivalents*, ou *poids de combinaison* (Mischungs-Gewicht).

4° La *loi de Berzélius*. — Ce n'est qu'une conséquence de la loi des proportions multiples, et une forme particulière que peut prendre cette loi dans les combinaisons ternaires dichotomiques, telles que les oxy-sels, et les sulfo-sels. Dans ces composés, la quantité d'oxygène ou de soufre contenue dans la proportion de l'acide est toujours un multiple simple de la quantité du même élément contenue dans la proportion de base.

Toutes ces lois s'expliquent et se traduisent aisément en formules, qui ont l'avantage d'être précises, et de parler clairement aux yeux, quand on les interprète dans le langage de la physique et de la chimie moléculaires. C'est parce que les combinaisons chimiques se font toujours suivant des proportions multiples, et le plus souvent très-simples, qu'on a conclu de là, qu'en remontant jusqu'aux dernières particules des composés, on les trouverait formées d'un, ou deux, ou trois, etc., atomes d'un élément, combinés avec un, deux ou trois, etc., atomes d'un autre élément. Cette idée de combinaisons par atomes n'est que la traduction du fait des combinaisons par multiples; et en même temps, c'est l'explication la plus naturelle qu'on puisse en donner. Elle a de plus l'avantage de nous fournir les moyens d'exprimer les combinaisons chimiques d'une manière simple et facile à retenir.

Autrefois, lorsqu'on voulait exprimer la composition d'un corps formé de plusieurs éléments, on indiquait par un nombre le poids de la proportion de chaque élément contenue dans cent grammes ou cent parties quelconques du composé; ainsi l'on disait : le cinabre est formé sur cent parties, de 15 parties de soufre et de 85 parties de mercure. Le calcaire, ou la pierre à chaux, est formé sur cent parties, de 43,71 d'acide carbonique, et de 56,29 de chaux. Il était difficile de retenir de pareils nombres. Aujourd'hui, on exprime plus simplement ces combinaisons en atomes, en disant : le cinabre est formé d'un atome de soufre et d'un atome de mercure; le calcaire est composé d'un atome de chaux et d'un atome d'acide carbonique. Il est clair que ces dernières expressions ne sont que l'équivalent des précédentes, et que, pour repasser facilement des unes aux autres, il n'est besoin que de savoir ce que pèse un atome de chaque élément. Or, les chimistes ont calculé une table de tous ces

poids d'atomes, en partant de quelques combinaisons simples, pour lesquelles le nombre des atomes composants était connu d'avance avec beaucoup de probabilité. On sent bien que le poids de chaque atome est facile à établir, quand on connaît le nombre de ceux qui entrent dans une combinaison dont les proportions des éléments sont données en poids.

On a imaginé de rendre les compositions atomiques en quelque sorte sensibles à l'œil, en les représentant par des signes de convention. Ainsi, l'on désigne les différents corps simples par les lettres initiales de leur nom : le soufre par S, l'oxygène par O, le carbone par C, le calcium par Ca, etc.; puis on convient de placer ces lettres à côté les unes des autres, pour marquer une combinaison, en les accompagnant de chiffres qui indiquent le nombre de fois que chaque atome se répète. Par exemple SO, SO^2, SO^3, sont les signes de trois combinaisons de soufre avec l'oxygène; dans la première, il y a un atome de soufre et un d'oxygène; dans la deuxième, un atome de soufre et deux d'oxygène; dans la troisième, un atome de soufre et trois d'oxygène.

Comme l'oxygène est, de tous les éléments, celui qui se trouve le plus fréquemment dans les combinaisons connues, on abrége encore les signes, en exprimant les atomes d'oxygène par de simples points placés au-dessus de la lettre qui désigne la base. Ainsi les combinaisons précédentes de l'oxygène et du soufre peuvent être représentées par les formules très-simples $\dot{S}$, $\ddot{S}$, $\dddot{S}$. La chaux a pour signe $\dot{C}a$; l'acide carbonique, $\ddot{C}$; et le calcaire, qui résulte de la combinaison de l'une et de l'autre, a pour formule représentative ou *formule chimique* $\ddot{C}\dot{C}a$. On peut pareillement abréger les formules des sulfures, qui, après les oxydes, sont les combinaisons les plus fréquentes en minéralogie, en exprimant les atomes de soufre par de petits traits verticaux placés au-dessus de la lettre qui exprime le radical. Le bisulfure de fer, ou la pyrite commune, composé d'un atome de fer et de deux atomes de soufre, peut donc être représenté indifféremment par la formule FeS^2, ou par le symbole plus simple $\overset{\shortparallel}{F}$.

On a souvent besoin de représenter la combinaison d'un certain nombre d'atomes d'oxygène ou de soufre avec deux atomes d'un radical, par exemple de trois atomes d'oxygène ou de soufre avec deux atomes de fer : ce genre de combinaison est ce que l'on appelle un sesqui-oxyde ou un sesqui-sulfure de fer. Si

l'on veut faire usage dans ce cas du mode d'abréviation dont nous venons de parler, il faut convenir d'un symbole particulier pour représenter un atome double. Le moyen qu'on a imaginé pour cela est des plus simples, il consiste à barrer transversalement la lettre qui désigne l'atome. Ainsi, $\overset{\cdots}{\text{F}\!\!\!-\!\text{e}}$ est l'équivalent de $Fe^2\,O^3$; et $\overset{'''}{\text{F}\!\!\!-\!\text{e}}$ celui de $Fe^2\,S^3$.

On voit donc qu'il y a deux manières d'exprimer les lois des combinaisons des corps : 1° par les rapports des quantités pondérales des éléments : c'est l'expression ordinaire d'une analyse en centièmes du poids du corps analysé; 2° par des formules représentatives de la composition, indiquant les nombres relatifs d'atomes élémentaires qui sont unis dans une molécule du composé. Cette seconde méthode a l'avantage de servir à rectifier le résultat de la première, par un calcul qui en fait disparaître les petites erreurs, toujours inséparables des observations. Ces méthodes sont d'ailleurs parfaitement équivalentes, puisqu'à l'aide de ce calcul on repasse aisément d'une analyse donnée en formule à une analyse exprimée en poids. Mais il faut avoir sous la main la table des équivalents ou des poids atomiques des différents corps simples, comme celle que nous donnons ici, et qui a été calculée, en supposant l'équivalent de l'oxygène pris pour terme commun de comparaison et représenté par 100.

TABLE DES POIDS ATOMIQUES DES SUBSTANCES ÉLÉMENTAIRES, AVEC LES SIGNES REPRÉSENTATIFS DES ATOMES.

Noms des substances.	Signes.	Poids atomiques.
Aluminium.	Al.	171,16
Antimoine.	Sb.	1612,90
Argent.	Ag.	1349,66
Arsenic.	As.	940,08
Azote.	Az.	175,06
Baryum.	Ba.	856,88
Bismuth.	Bi.	1330,38
Bore.	B.	136,20
Brôme.	Br.	999,62
Cadmium.	Cd.	696,76
Calcium.	Ca.	251,50
Carbone.	C.	75,415
Cerium.	Ce.	575,00
Chlore.	Cl.	443,28
Chrôme.	Cr.	328,59
Cobalt.	Co.	369,00

Noms des substances.	Signes.	Poids atomiques.
Cuivre.	Cu.	395,69
Etain.	Sn.	735,29
Fer.	Fe.	350,11
Fluor.	Fl.	233,80
Glucium.	G ou Be.	58,08 ou (190,05)
Hydrogène.	H.	12,50
Iode.	I.	1586,00
Iridium.	Ir.	1233,26
Lithium.	Li.	82,03
Magnésium.	Mg.	150,00
Manganèse.	Mn.	345,89
Mercure.	Hg.	1250,00
Molybdène.	Mo.	575,83
Nickel.	Ni.	369,67
Or.	Au.	2458,33
Osmium.	Os.	1244,21
Oxygène.	O.	100,00
Palladium.	Pd.	665,84
Phosphore.	P.	392,28
Platine.	Pt.	1233,26
Plomb.	Pb.	1294,50
Potassium.	K.	488,85
Rhodium.	R.	651,40
Selenium.	Se.	494,58
Silicium.	Si.	277,31
Sodium.	Na.	290,90
Soufre.	S.	200
Strontium.	Sr.	547,28
Tantale.	Ta.	860
Tellure.	Te.	802,12
Thorium.	Th.	744,90
Titane.	Ti.	314 ?
Tungstène.	W.	1150
Uranium.	U.	750
Vanadium.	V.	856
Yttrium.	Y.	402,50
Zinc.	Zn.	406,59
Zirconium.	Zr.	840,40

A l'aide de cette table, il sera toujours facile de passer d[illegible] analyse en poids à la formule atomique, et réciproquement. [illegible] effet, l'analyse d'un minéral, c'est-à-dire la composition rel[illegible] d'une masse de molécules, n'étant rien autre chose que c[illegible] d'une seule molécule, chaque proportion pondérale P, P', P[illegible] représente le poids d'un nombre déterminé d'atomes d[illegible]

même espèce : et, si l'on exprime par p le poids d'un de ces atomes, et par n leur nombre, chaque proportion sera égale à un produit de la forme np, en sorte que l'on aura autant d'équations de la forme $P = np$, qu'il y aura de principes élémentaires. Cela posé, si c'est l'analyse en poids qui est donnée, on connaîtra le produit total P par cette analyse, le facteur p par la table des poids atomiques, et en divisant P par p, on aura le second facteur n. Si c'est au contraire la formule qui est donnée d'abord, on connaîtra n par cette formule, p par la table des poids atomiques ; et on aura la proportion pondérale P en faisant le produit de p par n. Seulement dans le premier cas, il ne faudra pas oublier que les proportions pondérales P, P' P", etc., n'étant évaluées que d'une manière relative, les valeurs qu'on en déduit pour les nombres d'atomes correspondants n, n', n''... ne sont pareillement que des valeurs relatives, qu'on obtient sous forme de nombre fractionnaire : et il faudra substituer à ces valeurs approchées les nombres entiers, qui seront entre eux dans les mêmes rapports, en les exprimant de la manière la plus simple. Dans le second cas, on obtiendra, pour représenter le poids du corps analysé, un total qui différera de 100 ; et, pour ramener le total à ce nombre, comme on a l'habitude de le faire, il suffira d'un simple calcul de parties proportionnelles. Nous donnerons ici un seul exemple de ces calculs, qui ne peuvent offrir aucune difficulté.

La pyrite commune, analysée par Berzélius, lui a donné le résultat suivant :

Soufre.	53,92
Fer.	46,08
	100,00

Si l'on veut traduire cette analyse en formule, on obtiendra les nombres relatifs d'atomes, en divisant successivement les proportions relatives aux deux éléments soufre et fer, par le poids atomique de l'élément correspondant. Les quotients seront entre eux dans un rapport simple ; et, si l'on représente par 1 le plus petit des deux, l'autre sera représenté par un autre nombre entier. Le poids atomique du soufre est 200 : celui du fer 350 ; on posera donc

$$n = \frac{53,92}{200} = 0,2696, \text{ et } n' = \frac{46,08}{350} = 0,1316.$$

Or, le rapport 0,2696 : 0,1316 = 2 : 1 ; on voit donc que dans la

pyrite commune il y a deux atomes de soufre pour un atome de fer; et que par conséquent ce sulfure a pour formule atomique S^2Fe ou $\overset{\text{II}}{F}e$.

Il est aisé maintenant, par un calcul inverse, de trouver les véritables proportions en centièmes du corps analysé, en supposant qu'il n'y ait eu, dans le résultat de l'analyse, que les petites erreurs dont les meilleures opérations de ce genre ne sont jamais exemptes. On prendra, dans la table des poids atomiques, la valeur de $2S=400$, et celle de $Fe=350$, et l'on aura, pour représenter les véritables proportions, les deux nombres 400 et 350, ou 40 et 35, dont la somme sera

$$\begin{array}{r} 40 \\ 35 \\ \hline 75 \end{array}$$

et l'on ramènera le total à 100 parties, en posant les deux proportions :

$$\begin{array}{r} 75 : 100 :: 40 : x = 53,33 \\ 75 : 100 :: 35 : y = 46,66 \\ \hline 100,00 \end{array}$$

Telles sont les proportions calculées, que l'on doit substituer aux proportions données par l'observation directe.

Les formules atomiques, comme celle que nous venons de trouver pour la pyrite, ne sont pas seulement des signes abréviatifs : indépendamment de l'avantage qu'elles ont de présenter des rapports plus simples et plus faciles à retenir, elles en offrent encore plusieurs autres que nous devons signaler ici. Elles donnent, comme on vient de le voir, le moyen de rectifier les résultats des analyses, et d'atteindre les véritables rapports des éléments. En mettant ces résultats sous la forme atomistique, on trouve encore dans cette méthode un avantage bien précieux sur l'ancienne manière d'exprimer les analyses en poids. C'est que, par les nombres simples d'atomes dont elle indique la combinaison, on se fait une idée plus nette de la nature du composé, et de la différence qu'il y a entre deux corps, formés des mêmes éléments dans des proportions diverses, mais assez rapprochées. Par exemple, le réalgar ou sulfure rouge d'arsenic, et l'orpiment ou le sulfure jaune renferment, le premier : arsenic 70, et soufre 30; le second, arsenic 61, et soufre 39. Parce que l'un de ces sulfures semble quelquefois passer à l'autre, et à

cause du peu de différence qu'il y a entre ces deux rapports, Haüy avait été tenté de la regarder comme étant non essentielle; mais cette différence est pleinement justifiée par le calcul atomique, qui nous montre par la traduction en formules des résultats précédents, que dans l'orpiment il y a deux atomes d'arsenic et trois de soufre, tandis que dans le réalgar, il y a deux atomes de soufre pour deux d'arsenic. La différence consiste donc dans un atome de soufre en plus dans un des corps que dans l'autre. Et non-seulement les différences, mais aussi les analogies de composition, se décèlent par ce moyen. Le corindon est composé de 53,30 parties d'aluminium, et de 46,70 d'oxygène; le fer oligiste est formé de 69,34 parties de fer, et de 30,66 d'oxygène. Ces proportions ne nous disent pas, si les deux oxydes sont analogues, s'ils sont du même ordre, du même degré de saturation. Mais transformons les deux analyses en formules, et nous obtiendrons pour l'une la formule $\dddot{\bar{Al}}$, et pour l'autre la formule semblable $\dddot{\bar{Fe}}$. Les deux oxydes sont donc du même ordre : ce sont des sesqui-oxydes.

Les analyses des composés ternaires oxygénés ou sulfurés, c'est-à-dire des oxy-sels et des sulfo-sels, se traduisent aisément en formules, en plaçant l'un à côté de l'autre les signes des deux oxydes ou des deux sulfures dont ils sont la combinaison, affectés chacun d'un exposant qui marque le nombre des atomes. Ainsi, l'acide carbonique ayant pour signe $\ddot{C}$, et la chaux $\dot{Ca}$, le carbonate neutre de chaux sera représenté par $\ddot{C}\dot{Ca}$, étant formé d'un atome d'acide et d'un atome de base. Les composés quaternaires, ou les doubles-sels, ayant un même acide, ou une même base, se représentent au moyen des signes des deux sels, que l'on place à la suite l'un de l'autre, en les séparant par le signe +. Le feldspath orthose est considéré généralement comme formé d'un silicate d'alumine $\dddot{Si}^{3}\dddot{\bar{Al}}$, et d'un silicate de potasse $\dddot{Si}\dot{K}$, et sa formule s'écrit ainsi : $\dddot{Si}^{3}\dddot{\bar{Al}} + \dddot{Si}\dot{K}$. De même, le grenat calcaire est formé de $\dddot{Si}\dddot{\bar{Al}} + \dddot{Si}\dot{Ca}^{3}$. — Ces formules à deux termes sont ce qu'on nomme des formules *rationnelles* ou *théoriques*. On peut, pour plus de simplicité, les réduire à un seul terme, en écrivant les trois oxydes à la suite les uns des autres. Alors l'orthose aura pour formule $\dddot{Si}^{4}\dddot{\bar{Al}}\dot{K}$, et le grenat sera représenté par $\dddot{Si}^{2}\dddot{\bar{Al}}\dot{Ca}^{3}$. Ces dernières formules, dont nous ferons souvent usage, sont les formules *brutes* ou *naturelles*, telles qu'elles

tention d'y reconnaître et d'y démêler les substitutions isomorphes.

Avant d'exposer la règle que l'on suit dans le calcul des mélanges isomorphiques, nous donnerons le tableau suivant des divers groupes de corps simples ou composés, dans chacun desquels on a constaté les propriétés de l'isomorphisme, la connaissance préalable de ces groupes étant nécessaire pour l'application de la règle.

Corps simples.

1. Oxygène, fluor.
2. Soufre, sélénium.
3. Chlore, fluor, brô de.
4. Arsenic, antim ure, bismuth.
5. Etai
6. Fer, , cobalt, nickel.
7. Cuivre, arg

Composés bin es, oxydés.

De la formule RO. — 1. Chaux, gnésie, protoxyde de fer, protoxyde manganèse, oxyde de zinc, etc.
2. Baryte, strontiane, protoxyde de plomb, et chaux.

De la formule R^2O^3. — 1. Alumine, peroxyde de fer, sesquioxyde de manganèse, sesquioxyde de chrôme, sesquioxyde de titane.
2. Oxyde antimonique — acide arsénieux.

De la formule RO^2. — Acide titanique — acide stannique.

De la formule R^2O^5. — Acide phosphorique et acide arsénique.

De la formule RO^3. — 1. Acide sulfurique — acide sélénique — acide chromique — acide manganique.
2. Acide tungstique, acide molybdique.

Composés binaires sulfurés.

De la formule R^2S^3. — Sesquisulfure d'antimoine — sesquisulfure d'arsenic.

De la formule R^2S. — Sulfure de cuivre, sulfure d'argent.

Maintenant, toutes les fois qu'une analyse d'un minéral sera compliquée par la rencontre simultanée de plusieurs radicaux, bases ou acides, faisant partie d'un des groupes précédents, voici

la règle que l'on suivra pour la calculer. On rassemblera toutes les bases (plus généralement, tous les éléments ou composés binaires) qui appartiennent à un même groupe, c'est-à-dire, qui sont isomorphes entre elles; et, sans vouloir les calculer chacune pour son compte particulier, on traitera toutes celles d'un même groupe comme si elles étaient de même nature, ou comme si elles étaient associées et solidaires entre elles, cherchant seulement à déterminer le nombre total d'atomes, ou, d'après la loi de Berzélius, la quantité totale d'oxygène ou de soufre qu'elles peuvent fournir en commun. En procédant ainsi, on trouvera, si l'analyse est exacte, qu'elles donnent toutes à la fois le même nombre d'atomes, la même quantité d'oxygène ou de soufre, qu'une seule d'entre elles donnerait pour la quantité d'acide qui correspond à leur ensemble.

Les deux exemples suivants, tirés l'un d'une analyse de calcaire, l'autre d'une analyse de grenat, feront comprendre la règle précédente, et montreront toute l'importance de pareils calculs.

Supposons qu'on ait analysé un de ces calcaires spathiques, mêlés de carbonate de fer et de manganèse, qui sont communs dans certains filons, et qu'on ait trouvé le résultat suivant :

		Oxygène.	
Acide carbonique.	42,12	30,47	
Chaux.	38,94	11,06	15,25
Protoxyde de fer.	11,54	2,63	
Protoxyde de manganèse.	7,03	1,56	
	99,63		

Si l'on calcule les quantités d'oxygène contenues dans chaque proportion d'acide ou de base, ce qui est facile, parce que toutes les tables de poids atomiques font connaître combien il y a d'oxygène dans cent parties d'un acide ou d'une base quelconque, on obtiendra les nombres de la dernière colonne, qui, d'après la loi de Berzélius, devraient être entre eux dans des rapports simples. Il n'en est rien cependant, si on les compare entre eux d'une manière immédiate : mais, d'après la règle des combinaisons isomorphiques, les trois bases fournies par l'analyse appartenant à un même groupe d'isomorphes, ne doivent pas figurer dans cette comparaison, chacune séparément et pour son propre compte, mais bien toutes ensemble; on doit les considérer comme associées et comme étant solidaires,

comme apportant chacune son contingent d'oxygène dans la mise totale. Si l'on fait la somme des trois quantités d'oxygène qui leur appartiennent, on obtient, ainsi qu'on le voit ci-dessus, le total 15,25, qui est à très-peu près la moitié de la quantité d'oxygène 30,47 contenue dans la proportion d'acide. Le rapport qui exprime la loi de la combinaison est donc celui de 2:1, comme dans les carbonates neutres de chaux, de fer et de manganèse. Le minéral analysé a donc pour formule $\ddot{C}\dot{r}$, dans laquelle $\dot{r}$ représente un mélange de ($\dot{C}a$, $\dot{F}e$, $\dot{M}n$), équivalent à un même nombre d'atomes de l'une quelconque de ces bases.

Voici un second exemple, tiré des grenats, qui sont des silicates à bases d'alumine et de chaux, ou de leurs isomorphes. Le plus simple de tous les grenats, au point de vue de la composition chimique, serait celui qui ne contiendrait qu'une seule base sesqui-oxyde, comme l'alumine, et une seule base monoxyde, comme la chaux. Un pareil grenat existe, et il est appelé grenat de chaux ou grossulaire. Il est composé ainsi :

		Oxygène.	Rapports simples
Silice.	40,31	21,04	 2
Alumine.	22,41	10,46	 1
Chaux.	37,28	10,47	 1

On voit que les quantités d'oxygène de l'acide et des bases sont entre elles comme 2, 1 et 1, en sorte que ce grenat peut être représenté par la formule $\dddot{Si}^2\,\dddot{Al}\,\dot{Ca}^3$ (formule naturelle ou pratique), ou bien, en la dédoublant par le partage de l'acide entre les deux bases $\dddot{Si}\,\dddot{Al} + \dddot{Si}\,\dot{Ca}^3$ (formule rationnelle ou théorique).

Supposons maintenant qu'on ait analysé un de ces grenats colorés, si communs dans les collections de minéralogie, et qu'on ait obtenu le résultat suivant :

		Oxygène	
Silice.	38,61	20,06	
Alumine.	16,65	7,27	10,02
Péroxyde de fer.	7,33	2,25	
Chaux.	28,89	8,11	10,04
Protoxyde de fer.	6,35	1,44	
Protoxyde de manganèse. .	2,17	0,49	

Ce grenat renferme cinq bases différentes, mais qui appartiennent à deux groupes seulement de bases isomorphes, savoir les deux bases sesqui-oxydes (alumine et péroxyde de fer), et

les trois bases monoxydes (chaux, protoxyde de fer et protoxyde de manganèse). Il faut donc traiter séparément, d'abord les deux premières, et puis les trois autres, comme si celles d'un même groupe n'en faisaient qu'une seule. En procédant ainsi, on trouve 10,02 pour l'oxygène des deux premières, et 10,04 pour l'oxygène des trois autres; et comparant alors entre elles les trois quantités 20,06; 10,02; et 10,04, on voit qu'elles sont comme les nombres 2, 1 et 1, ce qui prouve que le grenat analysé est constitué suivant la même loi que le grenat simple appelé grossulaire; et il en serait de même de tous les autres grenats, quelles que fussent leurs couleurs accidentelles.

§ 3. *Composition typique, ou moléculaire.*

Abordons maintenant une dernière considération d'une grande importance en minéralogie, c'est celle des types de combinaison, des types moléculaires, envisagés non pas seulement sous les rapports de la forme purement géométrique, mais encore sous le rapport de la structure mécanique et de la composition chimique élémentaire. Les analyses chimiques, dont nous venons d'apprendre à calculer et à formuler les résultats, nous font connaître la composition qualitative des minéraux; elles nous font connaître de plus leur composition moléculaire, mais seulement d'une manière relative. Ainsi, quand nous représentons la composition de la pyrite par FeS^2, cela ne veut pas dire que dans la molécule de ce corps il n'y ait qu'un seul atome de fer et deux atomes de soufre; mais cela signifie seulement, que pour chaque atome de fer, qui peut s'y trouver compris, il y a deux atomes de l'autre élément. Nous ignorons quels sont les nombres absolus d'atomes qui entrent dans une molécule de ce composé, et lors même que ces nombres réels seraient précisément ceux que marque la formule, la connaissance de la composition moléculaire ne serait pas encore complète; car, pour qu'elle le fût, il faudrait que nous sussions en même temps quel est l'ordre de combinaison ou d'arrangement des atomes entre eux.

Ainsi, tout n'est pas dit sur la véritable nature chimique d'un composé, quand on a fait connaître ses éléments et leurs proportions relatives; il faut encore tenir compte et du nombre réel de leurs atomes, et de la manière dont ils sont unis entre eux. Il y a évidemment dans la composition moléculaire des modifications

possibles, que l'analyse ne saurait atteindre ; et l'on doit de toute nécessité distinguer entre la composition moléculaire réelle, déterminée d'une manière absolue dans son type particulier (*composition typique*), et la composition moléculaire apparente ou purement relative, telle que l'analyse nous la donne. C'est faute d'avoir fait cette distinction importante, admise généralement aujourd'hui, qu'il y a eu si longtemps des malentendus entre les chimistes et les minéralogistes au sujet de la composition chimique des minéraux et de la séparation des espèces; mais ces malentendus ont cessé pour la plupart depuis la découverte ou plutôt la reconnaissance formelle du fait, que les chimistes ont désigné par le nom d'*isomérie*. Ce fait consiste précisément, comme on l'a déjà vu p. 19, dans les différences, chimiques et physiques tout à la fois, qui peuvent exister entre des minéraux, qui, d'ailleurs, donnent le même résultat analyse, et qui, par conséquent, ont même composition chimique relative. De tels composés se nomment des composés *isomères*.

Les chimistes entendent par différence isomérique, toute modification qui a lieu dans l'intérieur de la molécule chimique, et qui a pour effet de changer ses réactions, en laissant subsister la nature et les rapports des éléments dont cette molécule est formée, en sorte que le résultat final de l'analyse reste le même. Il résulte de là qu'à leurs propres yeux, l'analyse n'est plus suffisante pour établir les véritables limites des espèces. Ils ne reconnaissent que deux cas d'isomérie : celui dans lequel les molécules chimiques ont des poids atomiques égaux, et sont constituées par un même nombre d'atomes arrangés différemment entre eux (*isomérie simple*), et celui dans lequel les molécules chimiques ont des poids atomiques différents, mais multiples (*isomérie multiple*), et doivent par conséquent renfermer des nombres d'atomes qui soient eux-mêmes multiples et par conséquent différents. Exemples du premier cas d'isomérie : les deux acides tartrique et paratartrique ; les deux acides cyanique et fulminique. Exemple du second cas : les acides gallique et ulmique. Les deux sortes d'isomérie d'ailleurs doivent toujours se manifester par des propriétés chimiques diverses.

Ce sont bien là en effet toutes les modifications qui peuvent avoir lieu au-dedans des molécules chimiques, sans qu'elles aient d'influence sur le résultat de l'analyse. Mais, en dehors de ces premières molécules, dans les groupes secondaires, qui en sont formées, et que nous avons appelées molécules physiques, ou

même dans la masse que ces molécules constituent par leur arrangement en commun, ne peut-il pas y avoir d'autres modifications capables d'entraîner des changements notables dans les propriétés physiques, par exemple dans la forme cristalline, sans en produire de sensibles dans les propriétés chimiques, et sans influer aucunement sur le résultat de l'analyse? De pareilles modifications, soit dans la constitution des molécules physiques, soit seulement, comme le veulent les chimistes, dans la structure et la densité du corps, existent bien réellement, et ce sont elles qui produisent les différences de forme et de caractères physiques que l'on observe dans le calcaire et l'arragonite, dans les deux sulfures de fer, etc. Mais, dans tous les cas de ce genre, les chimistes supposent que les modifications ont lieu en dehors des molécules, et n'influent que sur leur arrangement dans la masse générale ou sur leur cristallisation; et, admettant dans ce cas l'unité de molécules, et par conséquent de substance, ils disent de celle-ci qu'elle est *dimorphe* ou *polymorphe*, c'est-à-dire susceptible de plusieurs modes différents de cristallisation; ils n'attribuent donc pas au *dimorphisme* la même valeur qu'à l'isomérie, en ce qui concerne la séparation des espèces; et ils sont portés à établir une distinction tranchée entre les deux sortes de modifications, isomériques et polymorphiques; toutes deux ont cela de commun, qu'elles n'apportent aucun changement dans les résultats des analyses; mais elles auraient pour caractères distinctifs de donner lieu, l'une à des changements dans les propriétés chimiques, et l'autre à des changements dans les seules propriétés physiques.

Mais, est-il possible que la même substance chimique, la même espèce minérale puisse, sans éprouver de modification dans son type moléculaire, cristalliser sous une forme dans de certaines circonstances, et dans d'autres sous une forme incompatible avec la première? un changement dans les conditions physiques ou chimiques peut sans doute déterminer une modification dans le groupe moléculaire, du genre de celles que nous avons désignées sous le nom d'isomérie simple, mais moins profonde et moins stable : en sorte qu'on peut dire à la rigueur que les mêmes groupes d'atomes, sans augmenter ni diminuer de poids, mais en éprouvant une légère déformation, cristalliseront tantôt dans un système et tantôt dans un des systèmes voisins. Mais il nous paraît peu probable que, sans aucune altération dans leur forme propre, des molécules absolument identiques puissent ainsi

changer de rôle, dans l'acte de la cristallisation. Il nous est impossible de faire accorder ce prétendu fait avec cette conformité de symétrie qui doit toujours exister entre la forme de la molécule cristalline et celle du cristal lui-même, ainsi que nous l'avons établi dans nos considérations sur la structure.

Nous ne pouvons donc admettre avec les chimistes qu'il n'y ait rien de changé dans le groupe moléculaire des substances dimorphes ; que le dimorphisme soit un fait particulier, entièrement distinct de l'isomérie, et qu'il faille ériger, tout aussi bien que ce dernier fait, en nouveau principe. Nous pensons au contraire que ce qu'on a voulu exprimer par le mot de dimorphisme, n'est qu'un cas particulier d'isomérie, qui peut s'expliquer par une modification dans le type de la molécule cristalline, et doit s'expliquer ainsi, jusqu'à la preuve du fait contraire. Seulement, ce nouveau cas d'isomérie se rapporterait cette fois à la molécule physique, et non à la molécule chimique, comme les cas d'isomérie ordinaire, et pour cette raison même, ne pourrait se manifester d'une manière bien évidente que par des caractères physiques et notamment par une différence dans la forme cristalline. Au reste, de l'aveu même des chimistes, il est impossible d'établir de limite bien tranchée entre les cas de dimorphisme et ceux d'isomérie proprement dite : et telle modification qu'ils ont cru devoir rapporter au premier genre, pourrait bien n'être qu'une isomérie chimique, moins profonde et moins stable que les autres, qui disparaîtrait par le seul fait de la fusion ou de la dissolution des deux corps, en sorte que la différence qui établissait l'individualité de ceux-ci, n'existe plus au moment où le caractère chimique se manifeste. On peut donc, jusqu'à ce qu'on ait fourni la preuve du contraire, considérer le dimorphisme comme se rapportant, d'une manière ou d'une autre, au principe de l'isomérie. Quant à un dimorphisme réel et indépendant, comme serait celui d'une seule et même substance, dont les molécules physiques et chimiques ne varieraient pas, et qui, néanmoins, cristalliseraient tantôt en cubes, et tantôt en rhomboèdres ou en prismes rectangles, c'est jusqu'à présent un fait purement hypothétique.

Le dimorphisme ne sera donc pour nous que l'hétéromorphisme qui résulte de tout changement dans la forme et la symétrie des molécules ; et les modifications polymorphiques nous conduiront, tout aussi bien que les différences isomériques, à établir des distinctions d'espèce entre les minéraux. Nous aurons occa-

sion de revenir sur ce fait particulier dans les chapitres où nous traiterons des rapports entre la composition chimique et la forme cristalline, et des règles relatives à la spécification et à la classification en minéralogie.

CHAPITRE II.

DES DIFFÉRENTS CARACTÈRES TIRÉS DE LA COMPOSITION CHIMIQUE.

Après ces considérations générales qui appartiennent à la philosophie de la science, nous allons aborder un sujet d'étude plus pratique, c'est la recherche des moyens dont peut disposer le minéralogiste, pour découvrir ou constater la composition chimique des minéraux. Nous venons de voir combien il importe de faire une distinction entre la composition chimique absolue et la composition chimique relative. Cette dernière est la seule que nous fasse connaître l'analyse. Bien que le résultat de cette opération soit incomplet, puisqu'il nous laisse dans l'ignorance sur deux points essentiels, les nombres réels d'atomes, et leur ordre de combinaison, il n'en a pas moins une très-grande valeur, et on doit certainement le placer en tête des véritables caractères spécifiques, de ceux qui servent à établir les différences d'espèces en minéralogie.

Lorsque, cherchant les caractères spécifiques d'une substance que l'on rencontre pour la première fois, on veut arriver à la connaissance précise de sa composition chimique, c'est-à-dire de la nature et des proportions de ses éléments, il faut en faire une analyse exacte, en opérant avec tous les soins convenables sur un poids déterminé de la substance. C'est une opération longue et difficile, qui est plutôt du ressort du chimiste que du minéralogiste proprement dit; elle doit être faite chaque fois que l'on découvre une substance nouvelle, afin d'avoir une notion du corps aussi complète que possible. Mais, ce travail étant supposé fait pour chacun des minéraux connus, si l'on veut seulement reconnaître, à l'aide de caractères chimiques, un individu appartenant à une espèce déjà classée, il n'est pas besoin d'en répéter l'analyse, mais seulement d'en déterminer la composition qualitative, de soumettre la substance à un *essai chimique*, essai

1° *Sans addition.* On a pour but, en opérant ainsi, de reconnaître si la substance est fusible ou infusible; si elle est réductible ou non en un globule ou bouton métallique; si la chaleur en dégage un principe volatil qui s'y trouvait tout formé, ou qui se produit pendant le grillage même.

Pour essayer la fusibilité, on fait usage ordinairement de la pince ou du fil de platine. Dans le cas de fusion, on examine si le morceau d'essai se fond en un globule parfait; s'il s'arrondit seulement sur ses bords minces, ou se recouvre seulement à sa surface d'un simple enduit vitreux; si le résultat de la fusion est une *scorie*, c'est-à-dire une matière boursoufflée et irréductible en globule; une *fritte*, c'est-à-dire un corps qui a subi une fusion partielle, la partie non fondue étant disséminée dans la partie fondue; un *émail* ou corps vitreux opaque, blanc ou coloré; enfin, un *verre* proprement dit ou globule vitreux transparent pareillement blanc ou coloré, et dont l'intérieur peut être compacte ou bulleux. On examine encore si la forme du globule est sphérique ou polyédrique (globule ou bouton à facettes), si sa surface est lisse ou couverte d'aspérités, etc.

Dans le cas de non-fusion, on observe si la matière d'essai éprouve quelque altération ou changement d'aspect; si elle durcit ou devient plus tendre; si elle acquiert des propriétés alcalines, faciles à reconnaître au moyen des papiers réactifs; si elle prend de la saveur; si elle décrépite, c'est-à-dire éclate et se disperse en une multitude de parcelles; si elle s'exfolie, par la séparation des lames ou feuillets dont elle est composée; si elle se boursouffle ou s'épanouit en chou-fleur; enfin, si elle bouillonne par le dégagement de quelque gaz ou vapeur. Plusieurs de ces effets peuvent précéder celui de la fusion, et par là le modifier.

Dans le cas de volatilisation, on examine si elle est complète ou partielle. Pour sublimer les matières, qui se trouvent toutes formées dans le minéral, on pulvérise celui-ci et on le met dans un petit matras de verre à long col, ou simplement dans un tube de verre fermé par un bout *(tube fermé)*: et par l'action du feu, les matières volatiles se dégagent et vont se déposer ordinairement dans la partie supérieure du tube, qui est froide. Si le minéral renferme de l'eau, elle se vaporise et se condense en gouttelettes visibles dans le col du matras. La présence du fluor s'annonce par la formation d'un anneau blanc et terne qui se forme au-dessus de la matière d'essai. Celle de l'arsenic se manifeste par un sublimé cristallin et métalloïde; celle du sé-

nium par un sublimé rouge; celle du tellure par un sublimé gris, non cristallin; celle du mercure, par un sublimé gris qui se façonne en gouttes par l'agitation.

Pour reconnaître les matières volatiles qui se forment pendant le grillage, on met le minéral dans un tube de verre, ouvert par les deux bouts et un peu recourbé dans sa partie moyenne *(tube ouvert)*, puis on le chauffe au travers du tube; ou bien, on l'essaie en le plaçant dans une petite cavité, creusée vers l'extrémité d'un charbon. Dans le premier cas, on recueille ordinairement le sublimé dans le haut du tube. Par exemple, le tellure et les tellurures donnent un sublimé blanc d'oxyde de tellure, qu'on peut fondre ensuite en gouttelettes limpides; l'arsenic et les arséniures forment un dépôt blanc d'acide arsénieux, cristallin, infusible et volatil; l'antimoine et les antimoniures donnent des vapeurs blanches, épaisses, d'oxyde antimonique, qui se condensent promptement et forment un dépôt blanc qu'on nomme *progressif*, parce qu'on peut le chasser d'une partie du tube à une autre partie voisine, en le poursuivant pour ainsi dire avec le dard du chalumeau. Dans le cas où l'on se sert du charbon, le sublimé se répand dans l'atmosphère, et on ne peut le reconnaître qu'à son odeur, à la couleur propre de sa vapeur, ou à la teinte particulière qu'elle communique à la flamme du chalumeau. Une odeur d'acide sulfureux annonce la présence du soufre, une odeur d'ail l'arsenic, une odeur de raves le sélénium, etc. Il arrive souvent que le sublimé se dépose sur le charbon, tout autour de la cavité, et y forme des auréoles colorées, au moyen desquelles on reconnaît la nature des oxydes que le grillage a produits. C'est encore sur le charbon qu'on essaie les minéraux, pour savoir s'ils sont réductibles en globules métalliques.

2° *Avec addition*. On ajoute à la matière d'essai différents fondants ou réactifs, pour aider la fusion du minéral ou sa décomposition, ou bien pour découvrir les oxydes qu'il renferme, et quelquefois même amener leur réduction. On reconnaît le plus souvent les oxydes métalliques, sans avoir besoin de les réduire, par les couleurs qu'ils communiquent aux matières vitreuses dans lesquelles ils se dissolvent. Les principaux réactifs solides sont: le borate de soude, le carbonate de soude et le phosphate double de soude et d'ammoniaque, que, pour plus de brièveté, on désigne dans les essais pyrognostiques par les noms techniques de Borax, de Soude, et de Sel de Phosphore.

Le borax est un des fondants le plus ordinairement employés.

On s'en sert pour opérer la fusion et la dissolution à chaud d'un grand nombre de substances minérales. On obtient un verre presque toujours transparent après le refroidissement, et qui reçoit du corps dissous, des propriétés et des couleurs qui lui sont propres. Les différents oxydes métalliques se distinguent entre eux par les teintes différentes que prend le verre de borax, au feu de réduction et au feu d'oxydation, avant et après le refroidissement. Quelques-uns donnent des verres qui deviennent opaques au flamber, c'est-à-dire lorsqu'on les chauffe légèrement à la flamme extérieure de la lampe. Les essais par le borax se font ordinairement sur la lame ou le fil de platine. Un habile expérimentateur français, Lebaillif, a imaginé de les faire sur de petites coupelles blanches, très-minces et de 10 millimètres au plus de diamètre, qu'il formait avec parties égales de terre à porcelaine et de terre de pipe. Cette coupelle reçoit la matière d'essai mêlée au fondant, et se place ensuite sur le charbon ou entre les branches de la pince de platine. Au premier coup de feu, la matière entre en fusion et adhère à la coupelle : le verre qui se forme s'étend bientôt en surface sur un fond blanc, ce qui rend sa couleur plus facile à saisir. En opérant ainsi, on a encore l'avantage de pouvoir garder la coupelle et montrer en tout temps le résultat de l'essai et l'un des caractères de la substance.

L'oxyde de cobalt et les divers minerais de ce métal colorent en bleu le verre de borax, au feu d'oxydation comme au feu de réduction. Les oxydes de manganèse donnent à la flamme d'oxydation un couleur de rouge-violet ou améthyste ; à la flamme de réduction un verre incolore, s'il est promptement refroidi. Les minerais de chrome donnent à la flamme oxydante un beau vert d'émeraude, surtout à froid, et à la flamme réduisante un jaune brun à chaud ; le verre devient incolore après le refroidissement. Les oxydes de fer, au feu d'oxydation, donnent un verre rouge sombre à chaud, jaunâtre ou incolore à froid ; au feu de réduction, ils colorent en vert bouteille ou vert bleuâtre. Les oxydes de cuivre, au feu d'oxydation, donnent une couleur verte ; au feu de réduction, le verre de borax est incolore à chaud, et rouge de brique à froid. On emploie la soude comme fondant et dissolvant à chaud, et en même temps comme réactif, pour décomposer des sels insolubles, et déplacer leurs bases, en donnant lieu à un phénomène de double décomposition ; on s'en sert aussi pour aider à la réduction de certains oxydes métalliques.

On déplace les bases alcalino-terreuses par le moyen de la

e qui s'empare du principe acide; c'est ainsi qu'on reconnaît ésence de la silice dans un silicate, qui est infusible par lui-ıe, celle de l'acide titanique dans les titanates, etc. Les sili- infusibles, traités par la soude, fondent avec effervescence, onnant un verre transparent, qui dissout les bases auxquelles ude a enlevé la silice, pour former un sel soluble. La matière enant du traitement par la soude est attaquable par l'acide rhydrique ou azotique, et sa solution étant évaporée, on en re aisément la silice en jetant de l'eau sur le résidu, et fil-t ensuite.

ans quelques cas, on fond avec la soude, comme on ferait le borax, sur la lame ou le fil de platine, un minéral qui ient un oxyde colorant. On obtient une fritte verte avec les les de manganèse; avec les oxydes de chrome, on a la cou-vert-émeraude au feu de réduction, après le refroidissement, couleur jaune au feu d'oxydation.

ais le principal usage de la soude, est de servir, concurrem-t avec le charbon, à réduire les oxydes métalliques, et à faire ıuvrir dans les minéraux des quantités de métal réductible, petites pour échapper aux analyses faites par la voie hu-e. On pulvérise la matière d'essai, on la pétrit dans le creux main avec de la soude humectée, à laquelle on peut joindre ɔeu de poussière de charbon, et on chauffe le tout sur un bon solide. Si le métal est en grande quantité dans le mi-ıl, il se réduit en petits globules distincts que l'on peut re-llir et examiner. Mais si le métal est disséminé dans le erai en très-petite quantité, il est absorbé avec la soude par harbon. On enlève alors avec un couteau la pellicule de rbon que le mélange a pénétrée; on la broie sous l'eau, et on ensuite la poudre, en décantant successivement, jusqu'à ce tout le charbon soit enlevé: il ne reste plus alors que le al sous forme de petites paillettes brillantes, s'il est fusible ıalléable, et sous forme pulvérulente, s'il est cassant ou n'a subi la fusion. Cette manière d'agir de la soude a paru long-ps inexplicable. Il nous semble qu'on peut facilement en lre compte, en faisant remarquer que les carbonates alca-chauffés avec le charbon, se décomposent en partie en pro-ant de l'oxyde de carbone, gaz éminemment réducteur, qui, inuant entre les particules de la matière d'essai, agit ainsi plus d'avantage que le charbon lui-même.

e sel de phosphore agit comme fondant et aussi comme

des carbonates), ou bien qui se produit aux dépens du dissolvant lui-même : ce dernier cas est celui du bi-oxyde d'azote, qui se dégage d'une dissolution d'acide nitrique, quand on y projette de la limaille de cuivre, et qui se transforme en vapeurs rutilantes par sa combinaison avec l'oxygène de l'air. L'effervescence est quelquefois très-lente : on la rend plus vive en chauffant la dissolution.

Certains sels sont dits *déliquescents*, lorsqu'étant solubles et exposés à un air très-humide, ils attirent l'humidité atmosphérique, en si grande abondance, que l'eau qu'ils absorbent suffit à les dissoudre, en sorte qu'ils se résolvent en liqueur, ou tombent en déliquescence (le sel marin ; le carbonate de potasse). On appelle *efflorescents*, des sels qui tombent en poussière à l'air. Ce sont le plus souvent des sels hydratés, qui cèdent à l'air tout ou partie de leur eau de cristallisation ou de combinaison, produisant ainsi un effet tout opposé à celui qui détermine la déliquescence. Les sels de soude hydratés (natron ; sel de Glauber) sont très-efflorescents à l'air ; leurs cristaux tombent promptement en poudre, la décomposition du cristal amenant sa désaggrégation. Cependant une déperdition d'eau n'est pas la seule cause qui puisse produire un effet de ce genre : et il a lieu quelquefois par la cause contraire, c'est-à-dire par celle même qui produit la déliquescence. Certains sels entièrement privés d'eau, comme le sulfate de soude anhydre et la glaubérite, tombent en poussière à l'air, parce qu'ils s'hydratent en enlevant de l'eau à l'atmosphère, et que la désaggrégation est la conséquence de ce changement d'état.

Les caractères précédents se présentent en quelque sorte d'eux-mêmes, et ne sont que des caractères secondaires, comparables à ceux que nous avons décrits sous le nom de caractères extérieurs. Arrivons maintenant à des caractères qui dérivent, non plus de la simple observation, mais d'une expérience habilement dirigée, aux véritables essais chimiques qui se font par la voie humide. Ces essais consistent à mettre le corps que l'on veut examiner, en solution dans un liquide, et à faire réagir sur lui différents réactifs pareillement en solution, de telle manière qu'on puisse isoler par des précipitations successives les éléments simples ou binaires qui le composent, et les reconnaître aisément par la couleur ou la nature même des précipités obtenus. Ces essais étant précisément ceux qui sont en usage dans tous les laboratoires, pour la recherche de la com-

position qualitative des sels, nous nous bornerons ici à quelques indications générales, relativement à la marche que l'on suit dans ces opérations. Rappelons-nous d'abord que presque tous les minéraux résultent de la combinaison immédiate de principes électro-négatifs, qu'on nomme *acides* ou *minéralisateurs*, et de principes électro-positifs qu'on nomme *bases*. La recherche des principes électro-négatifs se faisant le plus ordinairement par la voie sèche, la voie humide est presque exclusivement réservée à la recherche des bases.

Comme on n'a pour but, dans ces sortes d'essais, que de distinguer la nature des composants, sans chercher à apprécier leur quantité, on n'opère jamais qu'en petit, sur une simple parcelle du minéral et sur quelques gouttes de solution, sans faire aucune pesée. Le plus souvent on se contente de placer une seule goutte de la solution au fond d'un verre de montre ou sur un carreau de vitre, on l'étend de deux à trois gouttes d'eau, et on fait tomber dessus une simple goutte du réactif, qu'on a enlevé du flacon à l'aide d'un tube de verre plein. Il faut avoir soin de ne faire usage que d'eau distillée et de réactifs bien purs. Pour faire les solutions, les filtrer et les évaporer, on se sert d'instruments les plus petits possibles.

Tous les essais par la voie humide exigent une opération préparatoire, qui consiste à mettre en solution le corps qu'on veut examiner. Or, nous avons vu que cela est toujours possible et en même temps facile : car, la plus grande partie des minéraux sont solubles immédiatement, à chaud ou à froid, soit dans l'eau, soit dans les acides ; et ceux qui ne le sont pas le deviennent, lorsqu'on les fond préalablement avec la soude ou la potasse. Cette fusion et la réaction qui l'accompagne amènent la destruction de la combinaison qui était auparavant insoluble, et rend à ses principes constituants la propriété de se dissoudre dans l'eau ou les acides. C'est ordinairement l'acide chlorhydrique ou l'acide azotique que l'on emploie comme dissolvant, et quelquefois un mélange des deux, connu sous le nom d'eau régale. On a soin d'observer si le minéral s'y dissout avec effervescence, en dégageant un gaz incolore ou coloré ; s'il s'y dissout lentement, sans effervescence, mais en produisant une sorte de gelée (plusieurs hydrosilicates) ; enfin, s'il se dissout sans effervescence et sans production de gelée. Cette apparence gélatineuse est due à la silice qui commence à se précipiter, et dont on débarrasse aisément la solution en évaporant à siccité, jetant de l'eau sur le résidu et

filtrant : la matière blanche qui reste sur le filtre est la silice pure.

Les principaux réactifs que l'on emploie pour l'examen des solutions sont, indépendamment des acides déjà cités, l'acide sulfurique, l'ammoniaque et la potasse caustique, le carbonate d'ammoniaque, l'oxalate d'ammoniaque et celui de potasse, le sulfhydrate d'ammoniaque, le sulfate de soude, le chlorure de platine, le cyano-ferrure jaune de potassium, l'azotate de baryte et l'azotate d'argent; ajoutons encore des lames métalliques de cuivre, de fer et de zinc.

Pour donner une idée de la manière dont se conduisent ces sortes d'essais, nous supposerons qu'on veuille déterminer la composition qualitative d'un silicate, c'est-à-dire d'un composé salin, formé par l'union de l'acide silicique avec autant de bases que l'on voudra. Les silicates sont pour la plupart insolubles. Il faudra donc le plus souvent commencer par calciner la pierre avec de la soude. Cela fait, on dissoudra complètement dans l'acide chlorhydrique ou l'acide azotique : après cette opération, on peut être sûr que la combinaison primitive a été détruite, et que les principes constituants du minéral sont totalement séparés. Pour se débarrasser de la silice, il faudra, comme nous l'avons déjà dit, évaporer la solution à siccité, après quoi on traitera le résidu par l'eau qui dissoudra toutes les bases, lesquelles seront à l'état de chlorures ou d'azotates, selon que l'on aura employé comme dissolvant l'acide chlorhydrique ou l'acide azotique. On filtrera la dissolution, et ce qui restera sur le filtre sera la silice.

Cela fait, on recherchera les bases dans la liqueur filtrée. On traitera d'abord la dissolution par l'ammoniaque caustique, jusqu'à ce qu'elle ait une légère odeur ammoniacale : l'ammoniaque précipitera toutes les bases moins puissantes qu'elle, telles que l'alumine, la glucyne, le péroxyde de fer, etc., et ne laissera dans la liqueur que les alcalis fixes, la baryte, la strontiane, la chaux, la magnésie, etc. Nous pouvons laisser de côté, pour le moment, les alcalis proprement dits, qui seront l'objet d'une recherche particulière, comme nous le dirons tout-à-l'heure. Il sera facile de séparer de la solution la baryte et la strontiane, si elles s'y rencontrent : car ces bases précipiteront par l'addition de quelques gouttes d'un sulfate. On précipiterait de même la chaux par l'oxalate d'ammoniaque, la magnésie par le phosphate de soude. Pour opérer ces précipitations successives, il faut partager la liqueur en autant de portions ou de gouttes que l'on veut tenter d'essais particuliers.

On passera ensuite à l'examen du précipité ammoniacal. Pour cela, on le traitera par la potasse caustique, qui dissout l'alumine et la glucyne : ces deux bases, si elles existent ensemble, pourront être facilement séparées l'une de l'autre par le carbonate d'ammoniaque. Le résidu du traitement par la potasse sera attaqué ensuite, 1° par le même carbonate, qui dissoudra l'yttria, la zircone, l'urane et le cérium; 2° par l'acide chlorhydrique, qui enlèvera les autres bases, telles que les oxydes de fer et de manganèse; et pour reconnaître ceux-ci, on fera usage d'un réactif spécial, le cyano-ferrure de potassium (prussiate jaune).

Nous ne pousserons pas plus loin ces détails. Mais, nous avons dit qu'il fallait faire un essai particulier, pour la recherche des alcalis dans les silicates. Dans ce cas en effet, on ne peut plus employer ces corps comme réactifs pendant les opérations. Il faut donc d'abord éviter de fondre avec les carbonates de soude et de potasse, et traiter en commençant la matière d'essai par le carbonate ou l'azotate de baryte. On ajoute ensuite du carbonate d'ammoniaque, qui précipite tout, à l'exception des alcalis, dont les carbonates sont seuls solubles. On filtre, on évapore à siccité, puis on chauffe à la chaleur rouge le résidu, après l'avoir mêlé à de la poudre de charbon. S'il reste quelque chose dans la capsule, c'est un alcali, dont on déterminera la nature par des réactifs convenables, après l'avoir dissous dans l'eau. On sait que la potasse précipite en jaune par le chlorure de platine; que la lithine précipite en blanc par le carbonate d'ammoniaque, et que la soude ne produit aucun de ces effets.

Si, au lieu d'un silicate, qui est un corps brûlé, de nature pierreuse, il s'agissait d'un composé combustible, appartenant à la classe des combustibles métalliques, dont les composants aient besoin de s'oxyder ou de se chlorurer préalablement, pour pouvoir se dissoudre, il faudrait alors employer pour dissolvant, non l'acide chlorhydrique, mais l'acide azotique ou l'eau régale. Dans le cas où l'on emploie l'acide azotique, il s'opère pendant la solution un dégagement de gaz coloré, de vapeurs rutilantes. Il y a des substances qui en se dissolvant ainsi donnent lieu à un précipité immédiat, que l'on commence par examiner. Ce précipité annonce la présence de l'antimoine, de l'étain ou du molybdène. On reconnaît ensuite dans la solution la présence du bismuth par l'eau; de l'argent, du mercure, du cuivre et du nickel, en y plongeant des lames de cuivre ou de fer. L'argent et le mercure se précipitent sur le cuivre; le cuivre sur le fer; et

s'il y a du nickel dans la liqueur où l'on a laissé séjourner une lame de fer, cette liqueur devient bleue par l'addition de l'ammoniaque. Après cela, on cherche à précipiter successivement par un sulfate, par l'ammoniaque, par le cyano-ferrure de potassium, c'est-à-dire que l'on rentre dans la série d'essais dont nous avons parlé tout-à-l'heure.

Les détails dans lesquels nous venons d'entrer sont loin d'être complets, et n'ont pour but que de donner une idée des essais méthodiques auxquels le minéralogiste peut avoir recours, pour déterminer avec certitude un corps dont il soupçonne la nature. Ces essais, nous l'avons dit, sont ceux qui sont en usage dans les laboratoires, pour l'examen préliminaire des substances que l'on doit soumettre ensuite à une analyse rigoureuse. Wollaston a, depuis longtemps, montré l'application qu'on pouvait faire des opérations chimiques les plus délicates, à la détermination des substances minérales : et Beudant est le premier minéralogiste qui ait introduit dans les éléments de la science (1) la manière de pratiquer ces essais en petit, et qui ait présenté systématiquement la série des résultats auxquels ils peuvent conduire, à l'exemple de ce que Berzélius avait déjà tenté pour les expériences faites par la voie sèche.

§ 3. *Des réactions chimiques les plus importantes.*

Nous terminerons ce chapitre par une indication rapide des moyens par lesquels le minéralogiste peut reconnaître dans un minéral la présence des parties composantes les plus ordinaires et en même temps les plus essentielles et les plus caractéristiques.

EAU. — Chauffés dans le tube fermé, tous les hydrates et tous les sels avec eau de cristallisation donnent de l'eau qui se condense en gouttelettes dans la partie supérieure du tube.

SOUFRE. — Les sulfures chauffés sur le charbon donnent de l'acide sulfureux, reconnaissable à son odeur ; quelques-uns cependant sont complètement volatils dans le tube fermé (les sulfures rouges de mercure et d'arsenic). D'autres se décomposent difficilement par la chaleur seule, mais tous donnent l'odeur sulfureuse, si l'on prend soin de les mêler d'abord avec de la limaille de fer. Par la fusion avec la soude, ils donnent une ma-

(1) Beudant, *Traité élémentaire de Minéralogie*, 2 vol. in-8° ; Paris, 18[illegible]. Idem, *Cours élémentaire de Minéralogie* et de *Géologie* ; Paris, 1845.

ui, projetée dans de l'eau acidulée, dégage de l'hydro-
ılfuré, que trahit son odeur fétide. Les sulfates, chauffés
ı mélange de soude et de charbon, dégagent de même
d'hydrogène sulfuré, quand on verse quelques gouttes
ıcidulée sur la masse fondue.

NIUM. — Dans le tube fermé, la chaleur dégage le prin-
s séléniures, et il va se condenser dans la partie froide du
ous la forme de poudre rouge. Sur le charbon ou dans le
avert, le sélénium est transformé par le grillage en un
volatil, d'une forte odeur de chou ou de raifort pourri.

NIC. — Sur le charbon et dans le tube ouvert, l'arsenic
es arséniures et les arséniates développent des vapeurs ar-
es qui ont une forte odeur d'ail.

MOINE. — Dans le tube ouvert, l'antimoine et les antimo-
donnent des fumées blanches, épaisses et abondantes,
leur d'ail, qui se condensent promptement sur le tube sous
de poudre blanche, et qu'on peut chasser d'un point du
un autre, en chauffant de nouveau. Les oxydes d'anti-
traités avec du charbon, présentent les mêmes carac-

LURE. — Le tellure et les tellurures donnent par le grillage
tube ouvert une fumée blanche, qui se dépose sous forme
udre blanche, laquelle se fond en gouttelettes limpides,
'on dirige dessus la flamme du chalumeau.

DE AZOTIQUE. — Les azotates sont solubles dans l'eau; pro-
ar des charbons incandescents, ils fusent ou s'étalent en
nt la combustion; mêlés à de la limaille de cuivre et traités
cide sulfurique, ils dégagent avec effervescence un gaz
reconnaît aux vapeurs rutilantes qu'il produit à l'air.

DE PHOSPHORIQUE. — Les phosphates produisent par la fu-
vec l'acide borique un globule vitreux, qui, chauffé de
au, attaque un fil-de-fer, que l'on plonge dans sa masse
e.

ORE. — Les chlorures donnent du chlore, qu'on reconnaît
odeur et à sa couleur, lorsqu'après les avoir mélangés avec
xyde de manganèse, on les traite par l'acide sulfurique
ntré. Ils colorent en bleu pourpre la flamme du chalu-
quand on les fond avec du sel de phosphore mêlé d'oxyde
ivre.

OR. — Les fluorures traités par l'acide sulfurique con-

centré dégagent des vapeurs d'acide fluorhydrique, que l'on reconnait à sa propriété d'attaquer le verre. On peut aussi les traiter avec le sel de phosphore, dans le tube ouvert, avec la précaution de diriger la flamme du chalumeau vers l'une des extrémités du tube, de manière que les vapeurs qu'elle contient puissent arriver sur la matière d'essai.

IODE. — Les iodures traités avec le sel de phosphore cuivrique, colorent la flamme du chalumeau en un beau vert; par l'action de l'action sulfurique concentré et de la chaleur, ils donnent des vapeurs violettes très-intenses. Les iodures en dissolution se manifestent par la coloration en bleu intense que l'iode communique à l'amidon. On mélange la dissolution avec de l'amidon dissous dans l'eau bouillante, puis on ajoute quelques gouttes de chlore, pour décomposer l'iodure et mettre l'iode en liberté.

BROME. — Les brômures fondus avec du sel de phosphore cuivrique, colorent la flamme du chalumeau en bleu-verdâtre; traités par un mélange d'acide sulfurique et d'oxyde de manganèse, ils dégagent des vapeurs de brôme, qui sont reconnaissables à leur couleur brune et à leur odeur particulière.

ACIDE BORIQUE. — L'acide borique en paillettes cristallisé donne immédiatement à l'alcool la propriété de brûler avec une flamme verte. Les borates sont décomposés par l'acide nitrique, et l'acide borique mis en liberté et contenu dans le résidu peut se dissoudre dans l'alcool et lui communiquer la même propriété.

ACIDE SILICIQUE, ou SILICE. — Les minéraux siliceux, fondus avec le sel de phosphore, abandonnent leur silice, qui forme une sorte de squelette ou un nuage pulvérulent au milieu de la perle vitreuse. Fondus avec la soude, ils donnent lieu à une matière soluble, dont la dissolution par l'acide chlorhydrique ou azotique précipite la silice par l'évaporation.

ACIDE CARBONIQUE. — Les carbonates se dissolvent dans l'acide sulfurique ou azotique, à froid ou à chaud, avec une effervescence plus ou moins vive, produite par le dégagement d'un [illegible] incolore et inodore.

ACIDE TITANIQUE. — Les oxydes de titane et les titanates [illegible] lorsqu'on les traite au feu de réduction par le sel de [illegible] un verre de couleur pourpre ou bleu-violâtre; [illegible] ajouter un peu d'étain à la matière d'essai. Par la [illegible] ils donnent un sel soluble, non dans l'ea[illegible]

dans l'acide chlorhydrique, dont la solution étendue d'eau devient violâtre par l'action d'un barreau de zinc.

ACIDE TANTALIQUE. — Les tantalates donnent, par la fusion avec la soude, un sel soluble dans l'eau, dont la solution précipite par l'acide azotique une poudre blanche, qui ne colore pas les verres formés par les flux ordinaires.

ACIDE MOLYBDIQUE. — Les molybdates donnent, par la fusion avec la soude, un sel soluble, dont la solution précipite par l'acide azotique une poudre blanche, qui devient bleue lorsqu'on la dépose sur un barreau de zinc.

ACIDE TUNGSTIQUE. — Les tungstates donnent, par la fusion avec la soude, un sel soluble, dont la solution précipite par l'acide nitrique une poudre, qui devient jaune par l'ébullition de la liqueur, bleuit au contact du zinc, et donne au feu de réduction un verre bleu avec le sel de phosphore.

ACIDE CHROMIQUE; OXYDES DE CHROME. — Les minéraux chromifères donnent avec le borax une perle d'une belle couleur verte, tant au feu d'oxydation qu'au feu de réduction.

ACIDE VANADIQUE. — Les minéraux qui renferment de l'acide vanadique, se comportent au chalumeau comme les chromates, mais à la flamme de réduction seulement, la couleur verte se changeant en jaune dans la flamme oxydante.

POTASSE. — Lorsqu'elle est en dissolution, elle précipite en jaune par le chlorure de platine. Ajoutée au borax, préalablement fondu avec de l'oxyde de nickel, elle fait passer la perle vitreuse de la teinte brune à la couleur bleue. Lorsqu'elle n'est point mêlée de soude, ni de lithine, elle colore en violet la flamme extérieure du chalumeau.

SOUDE. — Lorsqu'elle est en dissolution, elle ne précipite point par le chlorure de platine. On reconnaît sa présence dans la liqueur, après l'avoir transformée en sulfate; on fait ensuite évaporer et cristalliser la dissolution, et l'on obtient des cristaux efflorescents de sulfate de soude. A l'état d'hydrate, et chauffée fortement au chalumeau, elle colore en jaune-rougeâtre la flamme extérieure.

LITHINE. — Sa solution concentrée précipite par le carbonate de soude; le précipité tache en jaune-brun la feuille de platine, et colore en un beau rouge de carmin la flamme du chalumeau.

AMMONIAQUE. — Cet alcali ne se rencontre que dans des sels

solubles. Si l'on traite ces sels par un peu de soude ou de potasse caustique, la présence de l'ammoniaque se décèle par l'odeur piquante qui accompagne son dégagement à l'état de gaz.

BARYTE. — A l'état de sel soluble, elle précipite par l'acide sulfurique et les sulfates; et le précipité se forme toujours, lors même que l'on étend la dissolution de beaucoup d'eau.

STRONTIANE. — Mêmes caractères que pour la baryte, si ce n'est que le précipité cesse de se former, lorsque la solution est très-étendue. Ce précipité, chauffé avec de la poussière de charbon au feu de réduction, donne lieu à la formation d'une certaine quantité de sulfure de strontium, qui se dissout dans l'acide chlorhydrique; la dissolution mêlée à l'alcool, donne à la flamme de ce liquide une belle couleur d'un rouge purpurin.

CHAUX. — Elle est précipitée de ses dissolutions par l'oxalate d'ammoniaque. Le précipité exerce une réaction alcaline, après avoir été calciné.

MAGNÉSIE. — A l'état d'hydrate ou de carbonate, ou quand elle a été précipitée de ses dissolutions, elle se reconnaît à la propriété qu'elle a de se colorer en rose, quand on la traite au chalumeau, après l'avoir humectée avec une solution d'azotate de cobalt.

ALUMINE. — Précipitée de ses dissolutions par l'ammoniaque, et soluble dans la potasse caustique. A l'état libre, et même dans plusieurs de ses combinaisons, elle se reconnaît à la propriété qu'elle a de prendre une belle couleur bleue, lorsqu'on la calcine après l'avoir humectée d'azotate de cobalt.

GLUCYNE. — Précipitée de même par l'ammoniaque, et reprise par le carbonate d'ammoniaque. Soluble dans la potasse caustique.

YTTRIA. — Se comporte comme la glucyne à l'égard du carbonate d'ammoniaque; elle en diffère, en ce qu'elle est insoluble dans les alcalis caustiques.

ZIRCONE. — Se comporte comme l'yttria, à l'égard de la potasse, et comme la glucyne, à l'égard du carbonate d'ammoniaque.

OXYDE DE CÉRIUM. — Donne avec le borax et le sel de phosphore, au feu d'oxydation, un verre rouge ou orangé très-foncé à chaud, dont la couleur devient claire par le refroidissement, et disparaît complètement au feu de réduction.

OXYDE D'URANE. — Donne avec le sel de phosphore, au feu

d'oxydation, un verre jaune et une perle verte au feu de réduction.

Oxydes de fer. — Avec le borax et au feu d'oxydation, donnent un verre rouge sombre à chaud, jaune clair ou incolore à froid; au feu de réduction, une perle d'un vert foncé. Les oxydes de fer précipitent de leur dissolution par le cyano-ferrure jaune de potassium, le protoxyde en blanc, et le péroxyde en beau bleu (bleu de prusse).

Oxydes de manganèse. — Avec le borax au feu d'oxydation, donnent un verre d'une belle couleur violette ou améthyste, qui devient incolore au feu de réduction. Avec la soude, et toujours à la flamme d'oxydation, donnent une fritte de couleur verte.

Bismuth. — Fond très-aisément sur le charbon, en le couvrant d'une auréole d'oxyde jaune; attaquable par l'acide azotique, et précipité en blanc de sa solution par une simple addition d'eau.

Etain. — A l'état d'oxyde ou de sulfure, se reconnaît à l'auréole qui se forme autour de la matière d'essai, lorsqu'on le chauffe sur le charbon; cette auréole, qui est de couleur jaune à chaud, devient blanche par le refroidissement. L'oxyde d'étain est attaquable par l'oxyde chlorhydrique, d'où il est précipité en pourpre par le chlorure d'or.

Zinc. — Les minerais de zinc, traités sur le charbon avec la soude, donnent du zinc métallique et une auréole de fleurs de zinc, qui est blanche après le refroidissement, et devient d'un beau vert, quand on la chauffe de nouveau, après l'avoir humectée de nitrate de cobalt. L'oxyde de zinc, à l'état de sel soluble, est précipité de ses solutions par la potasse, sous la forme d'une masse blanche gélatineuse, qui se redissout par un excès du précipitant.

Plomb. — A l'état de sulfure ou de carbonate, se reconnaît à l'auréole jaune d'oxyde de plomb qui se forme autour de la matière d'essai, quand on la chauffe sur le charbon. En solution, précipite en blanc par l'acide sulfurique : le précipité noircit au contact de l'hydrogène sulfuré; il précipite sous forme de lamelles métalliques, quand on plonge dans la liqueur un barreau de zinc.

Argent. — Attaquable par l'acide nitrique. La solution donne par l'acide chlorhydrique un précipité blanc caillebotté, qui noircit à la lumière solaire, et se dissout dans l'ammoniaque.

Cuivre. — Les oxydes de cuivre colorent les verres de borax et de sel de phosphore, en vert au feu d'oxydation, et en rouge cinabre au feu de réduction. Les solutions des sels de cuivre sont bleues ou vertes. L'addition de l'ammoniaque donne lieu à un précipité bleuâtre, qui se redissout dans un excès d'alcali, en faisant passer la liqueur au bleu céleste.

Or. — Attaquable seulement par l'eau régale. Solution donnant un précipité pourpre par le protochlorure d'étain.

Platine. — Attaquable seulement par l'eau régale. Solution précipitant en jaune par le chlorure de potassium ou le chlorure ammoniaque.

CHAPITRE III.

DES RAPPORTS DE LA FORME CRISTALLINE ET DE LA COMPOSITION CHIMIQUE.

La plupart des substances capables de cristalliser ont une forme cristalline qui leur est propre, en même temps qu'une composition chimique déterminée. Mais la forme cristalline étant étroitement liée à celle de la molécule physique, et celle-ci dérivant à son tour du type particulier de la molécule chimique, lequel résulte de la nature, du nombre et de l'arrangement des atomes composants, on sent bien qu'il doit y avoir une certaine dépendance entre les deux caractères fondamentaux et d'ordres différents, qui nous servent à distinguer les espèces, savoir : le caractère physique de la forme cristalline, et le caractère chimique de la composition moléculaire, tel que le donnent les formules atomiques. Cette relation se manifeste par plusieurs phénomènes, dont nous avons déjà parlé (p. 28 et suiv.), et sur lesquels nous allons revenir : ce sont ceux que les chimistes et les cristallographes désignent par les noms de *polymorphisme* et d'*isomorphisme*. Elle apparait encore par l'influence prédominante que certaines parties composantes exercent évidemment sur la combinaison d'abord, et ensuite sur la cristallisation, et même sur l'ensemble des caractères physiques et extérieurs du minéral. Cette influence bien marquée de certains principes est précisément celle qui nous a conduits déjà à les distinguer, sous les noms de principes électro-négatifs ou minéralisateurs : ils sont

pour ainsi dire doués d'une force plastique particulière, d'un certain *nisus formativus*, tandis que les autres éléments ne sont que passifs, et se montrent dans un état de subordination, à l'égard des premiers.

§ 1. *Du polymorphisme.*

Nous avons vu qu'il existe des corps qui ont une même composition chimique relative, en ce qu'ils donnent exactement le même résultat à l'analyse, et qui diffèrent cependant par leurs propriétés chimiques, et de plus par leur forme cristalline, par leur densité et généralement par tous leurs caractères physiques. Les chimistes, comme les physiciens, admettent dans ce cas une modification dans les types de composition des groupes moléculaires, et par conséquent une différence de nature dans les corps dont il s'agit. Ces corps sont ce que l'on nomme des *composés isomères* (voyez p. 19).

Il existe en même temps d'autres corps qui présentent avec la même ressemblance de composition, la même diversité de forme cristalline et de propriétés physiques, mais dans lesquels il est difficile de constater une différence de nature par les moyens chimiques seuls. A cause de cette circonstance, on a supposé qu'il n'y avait rien de changé dans le groupe moléculaire de ces corps, ni par conséquent dans leur nature intime; et que c'était le même corps, qui se montrait avec des structures et des formes cristallines différentes; on a cru pouvoir conclure de ce fait, qu'une même substance, une même combinaison chimique, pouvait, en cristallisant dans des circonstances et sous des conditions physiques diverses, donner des cristaux géométriquement et physiquement différents, avec une composition identique. Dans cette hypothèse, le soufre qui, à 15°, cristallise par voie de dissolution, en octaèdres droits rhombiques, et celui qui a cristallisé à 110°, par voie de fusion, en prismes klinorhombiques, seraient un seul et même corps *dimorphe* (ou à deux formes différentes), une seule et même substance douée de *polymorphisme*, c'est-à-dire de la faculté de cristalliser, en diverses circonstances, sous des formes appartenant à des systèmes différents. Le calcaire spathique et l'arragonite seraient une même espèce chimique (le carbonate de chaux), cristallisant tantôt dans le système rhomboédrique, tantôt dans le système orthorhombique. Il en serait de même des deux pyrites ou bisulfures

de fer, dont l'une est cubique, et l'autre prismatique. L'acide titanique serait une substance *trimorphe* ou à trois formes différentes, et ce sont ces trois formes qui constitueraient seules les différences extérieures que nous offre ce composé, à l'état de rutile, d'anatase ou de brookite.

Dans cette manière de voir, établie d'abord par M. Mitscherlich, et adoptée depuis par la plupart des chimistes, le dimorphisme ou polymorphisme serait un principe nouveau, tout-à-fait distinct de l'isomérie. Nous l'avons déjà dit: pour nous, le fait qu'on a voulu exprimer par ce mot, n'est qu'un cas particulier d'isomérie, qui probablement se rapporte plutôt à la molécule physique qu'à la molécule chimique, mais qui n'en consiste pas moins dans une modification moléculaire, et par conséquent constitue pour le minéralogiste, des corps réellement différents, un véritable changement d'espèce. A ses yeux, le calcaire et l'arragonite ne sont pas une seule et même espèce dimorphe, mais bien deux espèces hétéromorphes. Le mot *hétéromorphie* devrait remplacer, dans les cas de ce genre, le mot *polymorphisme*, qui n'a de sens réel que pour ceux qui se placent au point de vue particulier des chimistes.

Nous le répétons encore: les différences polymorphiques peuvent s'expliquer de la même manière que celles qui tiennent à l'isomérie proprement dite; et la distinction qu'on a voulu établir entre les corps isomères et les corps polymorphes, nous semble complètement arbitraire. D'ailleurs, de l'aveu même des chimistes, on ne peut établir de limite bien tranchée entre les cas de dimorphisme et ceux d'isomérie; et telle modification qu'ils ont cru devoir rapporter au premier genre, pourrait bien n'être qu'une isomérie, moins stable et moins profonde que les autres.

Le polymorphisme, comme l'isomérie, se rencontre aussi bien dans les corps réputés simples, que dans les combinaisons proprement dites: cela tient à ce que toutes les molécules cristallines sont nécessairement polyatomiques, et par conséquent composées: seulement, dans le cas des substances élémentaires, les molécules sont formées par des atomes chimiques de même espèce, au lieu d'être composées d'atomes simples de plusieurs sortes. Dans les combinaisons proprement dites, où il existe une différence entre la molécule chimique et la molécule physique ou cristalline, celle-ci est de même un aggrégat d'atomes tous semblables entre eux: mais ces atomes sont composés, au lieu d'être simples: ce sont les molécules chimiques elles-mêmes. On

a cru devoir désigner par un nom particulier les modifications isomériques qui se rapportent aux molécules des corps simples: on les appelle des modifications *allotropiques*.

§ 2. *De l'isomorphisme.*

Quand deux composés chimiques sont formés par un égal nombre d'atomes, de nature différente, arrangés entre eux de la même manière, ils ont même type moléculaire, et par conséquent doivent présenter à la fois une formule de composition atomique semblable et une forme cristalline à peu près égale. Telle est la loi de l'*isomorphisme*, telle qu'elle a été reconnue et posée pour la première fois par M. Mitscherlich; et ce nouveau principe, dont la science s'est enrichie depuis les grands travaux du cristallographe français, a exercé la plus grande influence sur les progrès de la chimie et de la minéralogie. Deux corps *isomorphes*, dans le sens que le physicien allemand attache à ce mot, sont donc des corps qui offrent à la fois une double ressemblance de composition atomique et de forme cristalline, la ressemblance de la forme n'étant que la conséquence de l'analogie de composition. Si les deux corps cristallisent dans le système régulier, l'identité de forme est rigoureuse; mais si leurs formes se rapportent à l'un des cinq autres systèmes cristallins, l'isomorphisme n'est qu'approché, et ce n'est plus qu'un *homœomorphisme;* les formes sont à très-peu près les mêmes, et elles peuvent offrir dans leurs angles correspondants des différences, souvent légères, mais qui peuvent cependant s'élever jusqu'à deux ou trois degrés. Dans tous les cas d'isomorphisme, cités par M. Mitscherlich, les formes cristallines étaient du même genre et appartenaient toujours au même système: mais, suivant un habile chimiste français (M. Laurent), l'isomorphisme pourrait franchir les bornes ordinaires des systèmes cristallins et se montrer entre des formes de genres différents, mais cependant très-rapprochées, parce qu'elles sont placées sur la limite de deux systèmes voisins.

M. Mitscherlich a démontré l'existence de plusieurs séries de corps, dans chacune desquelles les composés se ressemblent par leur composition atomique et par leur forme cristalline. Ces substances sont le plus ordinairement des sels, au même degré de saturation, et composés d'un acide commun et de bases différentes, ou d'une même base et d'acides différents, mais de telle

manière que les bases ou acides qui diffèrent contiennent toujours le même nombre d'atomes d'oxygène. Ces acides ou ces bases, qui jouent le même rôle dans la combinaison, sont eux-mêmes isomorphes, c'est-à-dire qu'ils présenteraient une même forme, si on les trouvait cristallisés séparément. Ainsi, des bases ou des acides, qui sont isomorphes, communiquent la même propriété aux composés dont ils font partie, pourvu d'ailleurs que tout soit pareil dans la combinaison.

Nous citerons ici, comme un bel exemple de sels isomorphes, le groupe des carbonates neutres rhomboédriques, dans lequel on trouve un grand nombre d'espèces dont la formule générale de combinaison est $\ddot{C}\dot{r}$ (*r* désignant le radical variable de la base), et dont les formes cristallines sont des rhomboèdres obtus, dont l'angle varie au plus de un à deux degrés dans la série. Nous avons indiqué ailleurs (p. 480) les différents groupes de corps, dans lesquels l'isomorphisme a été constaté, tant parmi les corps simples, que parmi les composés binaires, acides ou basiques.

Non-seulement les éléments isomorphes ont la propriété de se substituer les uns aux autres dans un même type moléculaire, parce qu'ils y jouent très-sensiblement les mêmes rôles, tant chimiques que statiques; mais encore les molécules des composés isomorphes peuvent se remplacer les unes les autres, comme on l'a vu p. 66 et 67, parce que, sans être rigoureusement identiques, elles sont sensiblement équivalentes au point de vue physique et sous le rapport de la cristallisation, qui les emploie presque indifféremment les unes pour les autres. Cette propriété des molécules isomorphes de cristalliser ensemble en s'entremêlant entre elles, a été démontrée par M. Mitscherlich à l'aide de l'observation et de l'expérience: ce n'est que la généralisation d'un fait anciennement remarqué par Gay-Lussac dans la cristallisation des aluns potassique et ammoniacal. On se rappelle que, dans ces cas de mélanges intimes entre les molécules isomorphes, les angles du cristal mixte ont des valeurs peu différentes de celles des cristaux simples, que produirait chaque espèce de molécule séparément, et ordinairement des valeurs intermédiaires. Nous avons vu aussi comment la ressemblance de composition atomique de ces molécules chimiquement différentes permettait de soumettre au calcul les analyses de tous ces mélanges, malgré les variations à l'infini qu'elles peuvent offrir dans les proportions des composants.

Haüy était loin, comme nous l'avons dit, de soupçonner la possibilité de l'isomorphisme. Il pensait que deux minéraux de composition différente ne pouvaient avoir la même forme, à moins que ce ne fût une de celles du système régulier. La découverte de M. Mitscherlich a fait voir ce que cette assertion renfermait d'inexact : elle ne l'a pas complètement détruite, comme on l'a souvent répété : car, il faut convenir que, même dans les composés les plus exactement isomorphes, la différence de nature des éléments est toujours marquée par une différence correspondante dans la mesure des angles, les formes du système cubique exceptées ; mais cette différence est quelquefois très-faible et difficile à saisir.

Le principe de l'isomorphisme, énoncé d'abord d'une manière peu exacte, mais bientôt ramené par son auteur à sa véritable signification, a donné lieu, comme celui du polymorphisme, à de nouvelles attaques contre la méthode de Haüy. On a été jusqu'à proclamer sa défaite ; on a pris occasion de là, pour annoncer que la minéralogie venait d'être à tout jamais replacée sous l'empire de la chimie. C'était bien mal juger la valeur et la portée du nouveau principe, qui, loin de chercher à mettre aux prises les deux sciences, est venu plutôt pour les réconcilier, et cimenter entre elles une perpétuelle alliance. Qu'est-ce en effet que l'isomorphisme, si ce n'est une relation établie entre la forme cristalline et la composition chimique, relation qui se manifeste dans un grand nombre de cas où le chimiste et le cristallographe, au lieu d'opérer isolément, peuvent marcher de concert et contrôler leurs résultats les uns par les autres ? A l'aide de ce principe, les deux sciences désormais se prêteront un mutuel secours, et parviendront par là à éviter les erreurs dans lesquelles chacune d'elles est tombée, lorsqu'elle a été livrée à elle-même.

La découverte de ce principe est une des plus belles qui aient eu lieu dans le domaine de la cristallographie et de la minéralogie proprement dite, depuis les grands travaux de Haüy. C'est le pas le plus important qui ait été fait, en dehors du champ de la spéculation pure, pour arriver à la confirmation de cette vue d'Ampère, que dans les substances cristallisées, la forme des molécules intégrantes, et par suite celle du cristal lui-même, dépendent du nombre et de la disposition relative des atomes dont les molécules se composent. En faisant voir que l'analogie des compositions atomiques entraîne généralement comme conséquence

l'analogie des formes cristallines, M. Mitscherlich a mis hors de doute l'existence d'un lien caché entre la composition et la forme. Mais quelle est la nature de cette relation? comment telle composition atomique donne-t-elle naissance à telle forme cristalline? en quels nombres et dans quel ordre les atomes chimiques sont-ils distribués dans ce groupe moléculaire qu'on appelle la molécule physique du cristal, et dont dépend immédiatement la forme cristalline? C'est ce que la théorie connue de l'isomorphisme ne nous apprend en aucune manière.

Ampère a essayé le premier de déterminer les proportions atomiques des combinaisons, d'après certaines formes polyédriques qu'il regardait comme les formes représentatives de leurs molécules. Mais dans la construction de ces polyèdres moléculaires, il s'est appuyé uniquement sur des considérations puisées dans la théorie des volumes et dans ses propres idées sur la constitution des gaz, et n'a eu aucun égard à la forme particulière qu'affecte chaque combinaison, quand elle se présente à l'état cristallin. Quelques tentatives ont été faites pour continuer l'œuvre d'Ampère et étendre ses applications aux corps solides, avec l'intention avouée de tenir compte de leurs formes cristallines. M. Gaudin a présenté à l'Académie des Sciences plusieurs mémoires sur une nouvelle théorie relative au groupement des atomes dans la molécule et des molécules dans le cristal : cette théorie repose sur des hypothèses, et conduit à des conséquences que nous ne saurions admettre, parce qu'elles nous paraissent en opposition avec les principes et les faits les mieux avérés. D'autres essais encore ont été tentés pour arriver à grouper les atomes en molécules, propres à servir d'éléments aux formes cristallines. M. Baudrimont a cherché de son côté à construire quelques molécules, mais en se soumettant cette fois aux lois rigoureuses de la symétrie et faisant en sorte que la composition atomique absolue fût d'accord avec la forme cristalline. Enfin, nous avons essayé nous-même de construire géométriquement quelques formules atomiques, en cherchant aussi à accorder entre elles les indications de la chimie et de la cristallographie, sans faire aucune violence aux idées reçues dans l'une et l'autre science : tel a été l'objet d'un mémoire présenté par nous à l'Académie des Sciences en 1848 (1).

(1) Mémoire *sur une relation importante qui se manifeste, en certains cas, entre la composition chimique et la forme cristalline*; par M. Delafosse. (Publié dans les *Annales des Mines*, et le tome XIII des *Savants étrangers*.)

Les principes qui nous ont guidé dans le groupement des atomes en molécules cristallines, sont ceux même d'Ampère, mais convenablement modifiés et étendus. Nous avons admis avec lui, que les atomes de même espèce se placent généralement de manière que leurs centres de gravité occupent toujours des sommets identiques du polyèdre qu'ils figurent dans l'espace. Mais, en prenant cette idée pour point de départ, nous l'avons combinée avec une autre idée non moins essentielle, savoir : que la forme de la molécule doit toujours s'accorder avec celle du corps, par conséquent être une des formes mêmes de son système cristallin, et nous avons été amené naturellement, dans plusieurs cas, à une construction géométrique fort simple de la formule du corps, en rapprochant la loi numérique qui règle la répétition des parties identiques dans les diverses formes du système, des nombres mêmes d'atomes marqués par cette formule.

Mais, en procédant ainsi, nous avons été conduit à admettre, contrairement aux idées d'Ampère, que les sommets du polyèdre moléculaire ne sont pas toujours occupés par des atomes simples, qu'ils peuvent l'être aussi par des atomes complexes, et le plus souvent par des atomes composés binaires (oxydes, sulfures, chlorures, etc.), et que l'intérieur des polyèdres moléculaires ne reste pas constamment vide, mais qu'au contraire leur centre est le plus souvent marqué par un atome, qui peut pareillement être simple ou composé. Dans ce cas, la molécule est constituée par un noyau central et par une enveloppe polyédrique extérieure ; et c'est cette enveloppe superficielle qui détermine de la manière la plus immédiate la forme du groupe moléculaire : c'est elle qui, représentée par un certain groupe partiel d'atomes, et distinguée soigneusement de ce qui compose le reste de la molécule ou le noyau, établit une relation entre la forme et la composition atomique, et, remplissant une condition à laquelle la formule chimique doit satisfaire, fournit un moyen de contrôle pour la formule elle-même.

Nous aurons occasion, dans le cours de cet ouvrage, de citer plusieurs exemples de ces constructions ou transformations de formules atomiques en types moléculaires conformes aux types cristallins : mais il ne faut pas espérer que de pareilles constructions seront fréquemment réalisables : car elles supposent que la molécule cristalline est la molécule chimique elle-même, tandis que, le plus souvent, elle n'est qu'un groupe secondaire, un multiple de cette première molécule, et alors le type moléculaire

dépend bien plus immédiatement du facteur particulier qui détermine ce multiple, que des nombres mêmes d'atomes contenus dans la molécule qui se répète. Et d'ailleurs, même dans les cas où les molécules physiques et chimiques n'en font qu'une, il ne doit pas être toujours facile de démêler le véritable arrangement des atomes, parce qu'il est bien constant qu'un groupe de plusieurs atomes peut, dans certaines circonstances, jouer le même rôle, à la fois chimique et mécanique, que jouerait un atome simple, comme le prouve l'alun ammoniacal comparé à l'alun potassique; parce qu'une même sorte d'atome peut jouer un rôle multiple dans une même combinaison, ainsi qu'on le voit pour l'eau, qui peut être à la fois eau basique et eau de cristallisation dans les phosphates et autres sels; enfin, parce que des atomes de même nature peuvent, à la rigueur, ne pas jouer exactement le même rôle statique, se présenter dans le groupe général avec des orientations différentes; et il se pourrait que ce changement de position fût équivalent à une différence de nature.

L'isomorphisme, tel que nous l'avons considéré jusqu'à présent, est l'isomorphisme proprement dit, ou isomorphisme de Mitscherlich. Cet isomorphisme est rigoureux, quand il s'agit de cristaux appartenant au système régulier; il n'est qu'approché, quand les substances comparées se rapportent à l'un des cinq autres systèmes: mais dans les deux cas, la propriété que ce mot rappelle à l'esprit consiste toujours dans une double analogie que l'on observe, d'une part entre les formes cristallines, et d'une autre part entre les compositions atomiques de deux substances cristallisées. Ainsi, pour que deux corps soient isomorphes, dans l'acception ordinaire du mot, ou suivant la définition de Mitscherlich, il ne suffit pas que leurs formes soient semblables, il faut encore que leurs compositions chimiques puissent se ramener à une même formule, et dans ce cas, l'analogie des formes n'est qu'une conséquence de celle qui préexiste dans les types moléculaires.

Cette analogie des types moléculaires a été considérée comme déterminée généralement par une même loi d'arrangement des atomes composants, loi tout à la fois numérique et géométrique: mais cette égalité de nombre et cette similitude de disposition dans les parties du groupe moléculaire, doivent-elles se rapporter toujours aux atomes élémentaires proprement dits? On l'a pensé tout d'abord, et dans cette opinion l'on ne s'est pas contenté de

dire, que des corps de même composition atomique ont généralement des formes semblables (les cas de dimorphisme exceptés), on a cru pouvoir conclure de l'ensemble des faits connus, que deux corps, qui ont même forme cristalline, doivent avoir même composition atomique, et renfermer le même nombre d'atomes élémentaires, réunis entre eux de la même manière. On n'appliquait pas toutefois cette conclusion aux substances du système régulier, quoiqu'il y ait cependant des cas de véritable isomorphisme dans ce système, comme on le voit dans les aluns et dans les grenats. C'est par une application de ce principe, que l'on a été conduit à représenter l'alumine par la formule $\overset{\cdots}{\overline{\mathrm{Al}}}$, bien qu'on ne connût pas de degré inférieur d'oxydation pour l'aluminium, et on l'a fait uniquement, parce qu'un de ses isomorphes, le péroyxde de fer, a pour formule certaine, ou du moins très-probable, $\overset{\cdots}{\overline{\mathrm{Fe}}}$. Enfin, on a aussi conclu très-souvent de l'isomorphisme des combinaisons, à l'isomorphisme de leurs parties composantes.

Ces principes ne peuvent plus être admis aujourd'hui dans toute leur rigueur, et quoiqu'ils se vérifient très-souvent, on a été obligé de reconnaître qu'ils comportent d'assez nombreuses exceptions. Une de celles qu'on a d'abord remarquées, et qui a été signalée par M. Mitscherlich lui-même, est due aux modifications polymorphiques : ce savant voyait dans le dimorphisme du carbonate de chaux, une exception réelle à sa loi de l'isomorphisme, comme on avait vu dans la cristallisation de la boracite et de la tourmaline une exception à la loi de symétrie de Haüy : et c'est pour cela qu'il a cru devoir ériger le polymorphisme en un nouveau principe. Cependant, si les idées que nous avons émises sur ce fait sont exactes, l'exception ne serait qu'apparente, puisque, le polymorphisme n'étant qu'un cas d'isomérie, il y aurait toujours en réalité différence de constitution atomique, et comme conséquence naturelle, hétéromorphie. On a voulu voir encore une exception à la loi de l'isomorphisme, dans les deux oxydes de manganèse, appelés braunite et hausmannite, dont on représente les compositions par les formules $\overset{\cdots}{\overline{\mathrm{Mn}}}$, et $\overset{\cdots}{\overline{\mathrm{Mn}}}\,\dot{\mathrm{Mn}}$. Ces formules étant analogues à celles qui expriment les compositions du péroxyde de fer et du fer magnétique, les formes cristallines, qui se correspondent dans les deux séries d'oxydes, devraient être semblables, et cependant il n'en est rien. Mais, outre que les formules $\overset{\cdots}{\overline{\mathrm{Mn}}}$, et $\overset{\cdots}{\overline{\mathrm{Mn}}}\,\dot{\mathrm{Mn}}$ pourraient s'écrire d'une autre ma-

nière, $\ddot{Mn}\dot{Mn}$ et $\ddot{Mn}\dot{Mn}^2$, il se pourrait qu'il y eût là un cas particulier d'*isodimorphisme*, c'est-à-dire que chacun des oxydes de fer ou de manganèse fût dimorphe, avec isomorphisme entre les modifications correspondantes, cette double corrélation ayant déjà été observée plusieurs fois : mais ici, on ne connaîtrait du premier corps que l'une des deux formes possibles, et du second que l'autre forme, cas tout-à-fait semblable à celui que nous offrent les sulfures d'argent et de cuivre, qui peuvent être dits isodimorphes au même titre.

Mais, ce qui constitue une exception réelle, non pas à la loi de l'isomorphisme bien entendue, mais à l'interprétation ancienne de cette loi, d'après laquelle les nombres vrais d'atomes *élémentaires* devraient toujours être égaux, c'est ce fait bien avéré, et très-facile à concevoir, qu'un certain groupe d'atomes peut être isomorphe avec un atome simple, et le remplacer dans une combinaison, sans qu'il y ait altération notable dans la forme cristalline, parce que ce groupe d'atomes est iso-dynamique avec l'atome simple, c'est-à-dire joue absolument le même rôle, soit chimique, soit statique. C'est ce que l'on voit dans l'alun ammoniacal comparé à l'alun potassique, où l'atome complexe AzH^4 remplace l'atome simple du potassium. Il arrive souvent qu'un atome simple soit isomorphe avec deux ou trois atomes d'une autre espèce : c'est ce que l'on voit dans les sulfures d'argent et de cuivre, AgS, Cu^2S, qui sont isomorphes, et où par conséquent Ag équivaut à $2Cu$. On a voulu identifier les deux formules, en dédoublant le poids atomique de l'argent, ce qui permet d'écrire Ag^2S; mais un tel changement ne ferait pas disparaître toutes les anomalies : car, si AgS est isomorphe à Cu^2S, il paraît l'être aussi avec PbS; et ce dernier cas d'isomorphisme nous obligerait à ramener la composition atomique du sulfure d'argent à sa première forme. Suivant M. Scheerer, il arriverait souvent que, dans les silicates magnésiens, un atome de magnésie serait remplacé par trois atomes d'eau basique, et non par un seul; et ce remplacement d'un atome simple par un atome multiple constitue à ses yeux un cas particulier d'isomorphisme qu'il appelle *isomorphisme polymère*, pour le distinguer des cas ordinaires où l'isomorphisme peut être dit *homœomère*.

Nous verrons ailleurs que des raisons assez puissantes ont conduit les minéralogistes à penser que, dans certains cas, la silice $\dddot{S}$ pouvait être remplacée par l'alumine $\dddot{Al}$, malgré la différence

des formules, l'alumine dans ce cas faisant fonction d'acide; que dans d'autres circonstances, où l'alumine joue le rôle de base, elle peut remplacer certaines bases à un atome d'oxygène (1). Ce changement de rôle, et sans doute le changement de constitution intime qu'il suppose, peut être attribué à une action de présence, ou à une influence prédominante exercée par certains principes, sur les composés qui sont près d'entrer en combinaison.

Il importe de remarquer en effet que l'isomorphisme, qui consiste essentiellement en une ressemblance de type moléculaire dans certains composés et dans leur aptitude à remplir les mêmes fonctions, n'est pas un caractère fixe, qui leur soit inhérent et préexiste toujours à l'acte de la combinaison ultérieure ou de la cristallisation, par lequel nous le constatons; il est souvent produit par les circonstances mêmes qui accompagnent cet acte. Ainsi, lorsqu'une combinaison saline est dimorphe, la présence dans la dissolution d'un petit cristal de l'une des deux formes détermine quelquefois le sel à cristalliser sous cette forme, de préférence à l'autre. Il y a donc une sorte d'isomorphisme, qu'on peut appeler *conditionnel*, parce qu'au lieu de précéder la combinaison, il dépend d'elle en quelque sorte, étant dû à une action de présence que certaines molécules physiques exercent sur d'autres, pour les ramener à leur propre type, ou bien aux réactions mutuelles qui ont lieu entre les différentes molécules, et d'après lesquelles elles se modifient réciproquement pour arriver toutes à une forme moyenne et commune.

Ces sortes d'actions peuvent être à la fois physiques et chimiques. Le sulfure d'argent et le sulfure de cuivre sont isodimorphes: le premier, quand il est seul, cristallise en cube, et le second de son côté en prisme orthorhombique : mais quand ils cristallisent ensemble, le sulfure de cuivre oblige le sulfure d'argent à prendre l'état polymorphique pour lequel il a le plus de tendance, et il se produit des cristaux de stromeyérine, qui ont la forme du sulfure de cuivre. L'arsenic et l'antimoine ne passent pas ordinairement pour être isomorphes avec le soufre : cependant on

(1) Dans ce cas, on la considère comme étant équivalente à trois atomes d'une pareille base; et plusieurs chimistes ont même émis l'opinion que tout sesquioxyde, tel que $\dddot{\text{Al}}$, $\dddot{\text{Fe}}$, $\dddot{\text{Mn}}$, se divisait réellement en trois atomes simples de la forme $\dot{r}$, en sorte que $\dddot{\text{Al}}$ soit égal à $3.\dot{al}$, en représentant par *al* les $\frac{2}{3}$ de Al.

ne peut guère douter qu'ils ne le deviennent en sa présence dans les arsénio-sulfures de nickel, de cobalt et de fer, et dans l'antimonio-sulfure de nickel.

Les réactions n'ont pas seulement pour effet de produire dans un des composés une simple modification physique, qui le rende isomorphe à l'autre, en même temps qu'elle le transforme en un de ses états polymorphiques : dans quelques cas, elles produisent une modification chimique, et amènent la formation d'un nouveau composé, qu'on ne rencontre pas à l'état libre, parce qu'étant peu stable par lui-même, il ne peut naître et se maintenir qu'en présence du composé plus fixe qui a provoqué sa formation. Tel est le cas du sesquioxyde de titane, dont on admet l'existence, et seulement à l'état de mélange, dans les oxydes de fer titanés. On pourrait encore citer comme exemples d'un isomorphisme conditionnel ou accidentel, avec modification préalable dans la composition chimique, ces mélanges cristallins artificiels, originaires de sulfates hydratés qui différaient primitivement par le nombre de leurs atomes d'eau de cristallisation et par leurs formes, et qui, en se combinant, sont parvenus à s'identifier sous les deux rapports. Ces réactions mutuelles ont toujours lieu dans les cas d'isomorphisme ordinaire, où l'égalité des formes n'est qu'approchée : il arrive toujours que les molécules de nature différente et de type à peu près semblable, lorsqu'elles viennent à se mélanger et à cristalliser ensemble, réagissent les unes sur les autres, et par leur mutuelle influence, se modifient de manière à prendre une forme commune, moyenne entre toutes les formes particulières des composants. Il se passe là quelque chose d'analogue à ce qu'on voit dans deux pendules dont la marche est un peu différente et que l'on attache à un même support : elles s'influencent l'une l'autre par la communication réciproque de leurs mouvements, et finissent bientôt par se mettre d'accord.

Ce que nous venons de dire, de cette tendance qu'ont en général les molécules isomorphes, en prenant ce mot dans sa acception habituelle, à se modifier réciproquement quand elles sont mêlées ensemble, pour s'assimiler complètement les unes aux autres sous le rapport de la forme, peut s'appliquer à des molécules qui ne rempliraient pas tout d'abord les conditions ordinaires de l'isomorphisme, mais qui seraient capables de les acquérir par de légères modifications chimiques dans leurs compositions déjà à peu près semblables.

Remarquons ici que ces actions de présence ou ces réactions

mutuelles, pour être efficaces, peuvent exiger des proportions relatives à peu près constantes, ou du moins dont les variations se renferment dans des limites assez étroites; et c'est sans doute ce qui explique ces sortes de mélanges isomorphiques, qui offrent presque toujours des rapports simples et à peu près fixes, parce qu'ils ont dû se faire dans les conditions qui rendaient leurs composants plus propres à s'assimiler entre eux. Il résulte de là que beaucoup de mélanges de ce genre peuvent simuler de véritables composés définis, et qu'on a dû les confondre souvent avec les combinaisons chimiques proprement dites, c'est-à-dire les combinaisons intra-moléculaires. Exemples : la dolomie; l'antimoine arsénical; le prétendu tellurure de bismuth, etc.

Enfin, ces mêmes réactions entre des molécules de nature différente, peuvent nous conduire à concevoir la possibilité d'un nouveau cas d'isomorphisme que M. Hermann a proposé d'admettre sous le nom d'*isomorphisme hétéromère;* il se pourrait en effet qu'il existât une combinaison isomorphique, entre des composés de formules différentes (composés hétéromères), mais qui, sans être tout-à-fait semblables, auraient cependant entre eux une certaine analogie, une ressemblance au moins partielle et de forme et de composition.

Il est certain qu'il y a des groupes de corps qui présentent un *isomorphisme partiel*, qui se montrent, par exemple, parfaitement isomorphes dans la zône du prisme fondamental, tandis que leurs cristaux diffèrent un peu plus par les sommets, étant terminés tantôt par une base droite, tantôt par une base légèrement oblique dans un sens ou dans un autre; et ces corps en même temps ont des compositions très-rapprochées. C'est un hémisomorphisme tout à la fois chimique et géométrique, provenant sans doute de ce que les molécules sont elles-mêmes semblables en partie par leur composition et par leur structure; et elles engendrent des formes cristallines qui, sensiblement les mêmes dans deux de leurs dimensions, ne diffèrent que par la troisième. Il y aurait à distinguer dans ces petits groupes moléculaires, deux sortes de parties, les parties latérales qui seraient formées par un même nombre d'atomes, disposés de la même manière, et les parties terminales, qui auraient une constitution atomique un peu différente, celle-ci n'ayant d'autre effet que de modifier légèrement la terminaison du prisme fondamental. Dans beaucoup de sels hydratés, cette variation pourrait provenir du nombre des atomes d'eau, qui se trouveraient rejetés vers les deux extrémités de l'axe.

Un pareil groupe de composés isomorphes, bien qu'hétéromères, pourrait se comparer au groupe des tartrates, si bien étudié par M. Pasteur, et dans lequel il a toujours trouvé sensiblement le même prisme, avec une base tantôt droite, et tantôt légèrement oblique, quoique ce groupe fût composé de tartrates simples ou doubles, de monotartrates ou de bitartrates. Le règne minéral me paraît offrir des exemples de cas tout semblables, surtout dans la grande classe des silicates. Je citerai le groupe des mésotypes, qui comprend la natrolithe, la mésolithe et la scolésite, et présente dans ces diverses espèces des cristaux prismatiques, isomorphes dans la zône principale, mais ayant comme le prisme des tartrates une base variable, tantôt droite, et tantôt légèrement inclinée; on voit aussi dans ce groupe le nombre des atomes d'eau varier, et déterminer, en même temps que la modification de la forme, un changement dans les propriétés physiques, puisque la scolésite est pyro-électrique, et que la natrolithe ne l'est pas. Le groupe des feldspaths, le groupe des amphiboles et pyroxènes, celui des silicates simples d'alumine, comprenant la staurotide, le disthène et l'andalousite, peuvent aussi venir à l'appui du fait que je cherche à établir en ce moment. Ce fait ne serait pas bien éloigné de celui que M. Hermann appelle l'isomorphisme hétéromère, et il aurait surtout la plus grande affinité avec l'hétéromérie, telle que la conçoit M. Rammelsberg, et avec la nouvelle constitution qu'il prête aujourd'hui aux tourmalines et aux micas. Si le mélange est possible entre composés hétéromères de ce genre, l'isomorphisme, de partiel qu'il était auparavant, doit devenir complet par suite des réactions qui s'opèrent entre les diverses molécules : car, il faut toujours qu'elles finissent par s'assimiler entre elles, pour produire une cristallisation parfaitement régulière.

Les corps qui sont isomorphes dans le sens ordinaire du mot, c'est-à-dire géométriquement et chimiquement à la fois, le sont aussi sous les rapports purement physiques; et il arrive le plus souvent que si l'un d'eux possède des clivages très-nets, les autres présentent des clivages analogues, comme on le voit dans le groupe des carbonates spathiques; il est cependant quelques exceptions à cette règle. Les corps isomorphes doivent avoir des structures réticulaires semblables, offrir un même mode de cristallisation; les parallélipipèdes générateurs de leurs réseaux cristallins doivent être sensiblement égaux, par conséquent aussi, leurs volumes moléculaires et leurs densités géométriques (voyez

pages 301 et 302); enfin leurs poids spécifiques doivent être entre eux dans le même rapport que leurs poids atomiques. C'est en effet ce que confirme l'expérience: si l'on calcule les volumes moléculaires des substances isomorphes en divisant le poids atomique de chacune d'elles par sa densité, on obtient des quotients qui sont généralement égaux, et dans le cas où l'égalité n'a pas lieu, dans des rapports très-simples les uns avec les autres (1).

Après avoir reconnu que les corps isomorphes, tant simples que composés, avaient très-souvent des volumes moléculaires égaux, ou du moins en rapport très-simple entre eux, on a voulu considérer cette égalité ou proportionnalité des volumes, non-seulement comme un signe de l'isomorphisme, mais encore comme la condition fondamentale et le principal caractère de cette propriété.

Mais, pour ce qui regarde la simple proportionnalité des volumes, je ferai remarquer qu'elle peut avoir lieu dans un grand nombre de cas, où le véritable isomorphisme n'a pas lieu. Une des causes de cette proportionnalité est, comme on l'a vu p. 302, le changement de mode ou d'assemblage des mêmes molécules dans un même système cristallin; une autre cause est un changement dans les longueurs relatives des paramètres fondamentaux, qui est tel qu'une ou deux des arêtes du parallélipipède générateur sont à très-peu près doublées, triplées ou quadruplées, tandis que les autres dimensions ne subissent pas la même modification; et que les angles restent à peu près ce qu'ils étaient auparavant. Il en résulte que les deux parallélipipèdes sont sensiblement équiangles, sans être égaux ni semblables; dans ce cas, il n'y a entre les deux substances qu'un isomorphisme apparent ou purement géométrique; la forme primitive de l'une

(1) M. Dana détermine le volume moléculaire d'un corps, non par l'équation $v = \frac{p}{d}$, mais par celle-ci: $v_1 = \frac{p}{\alpha . d}$, dans laquelle α représente le nombre total des atomes que marque la formule chimique, et il donne au volume v le nom de volume moléculaire aggrégé, et au volume v_1 celui de volume moléculaire *simple*. Ce volume v_1 est, à proprement parler, le volume atomique moyen, ou celui qui appartiendrait à chacun des atomes, si l'on remplaçait leur poids atomique propre par un poids atomique moyen. En opérant ainsi, il trouve que, dans le plus grand nombre des cas, la proportionnalité des volumes disparaît pour faire place à une égalité, qui devient ainsi le caractère le plus constant de l'isomorphisme. Or, pour que les volumes calculés de cette manière deviennent égaux, il faut que les volumes primitifs soient entre eux comme les nombres α, α' des atomes contenus dans les deux formules, ou que les densités soient proportionnelles aux poids atomiques moyens.

diffère de celle de l'autre, mais on peut faire en sorte qu'elle la reproduise à très-peu près, en multipliant par des facteurs très-simples un ou deux de ses axes fondamentaux. Ce cas d'isomorphisme purement géométrique se présente en effet très-souvent; c'est lui qu'on a désigné par les noms particuliers de *plésiomorphisme* ou d'*homœomorphisme*. Dans ce cas encore, les volumes moléculaires sont multiples simples l'un de l'autre.

On voit donc que la proportionnalité des volumes moléculaires est d'une part la conséquence d'un simple changement de mode cristallin, de l'autre un des caractères inhérents au plésiomorphisme. Ce serait donc à tort qu'on la regarderait comme le fondement de l'isomorphisme proprement dit. Une condition essentielle de l'isomorphisme véritable nous paraît être que le volume moléculaire, en tant du moins qu'il se rapporte aux molécules physiques, éléments immédiats du cristal, soit sensiblement *égal*, et le parallélipipède qu'il représente à très-peu près semblable dans les corps que l'on compare. Cette condition même ne suffit pas, car on conçoit aisément des cas de plésiomorphisme dans lesquels elle peut avoir lieu. Il faut de plus, pour remplir tout-à-fait l'idée que les physiciens et les chimistes se font de ce genre d'analogie, y joindre une autre condition, à la fois physique et chimique, celle que les molécules soient *isodynamiques*, et qu'elles puissent se remplacer les unes les autres, aussi bien dans l'acte de la combinaison chimique que dans celui de la cristallisation

Il résulte de ce qui précède, que le caractère qu'on a cru reconnaître dans la comparaison des volumes moléculaires ne permet pas de distinguer entre l'isomorphisme vrai et le simple plésiomorphisme; et, comme il peut se présenter accidentellement dans des corps, qui en réalité ne seraient ni isomorphes, ni plésiomorphes, on doit conclure qu'il n'est point un indice sûr de l'existence de l'isomorphisme proprement dit, et qu'il est impossible de l'envisager comme le fondement de cette analogie. On peut dire seulement que, quand celle-ci préexiste, il en est la conséquence.

Si cette relation de volumes n'est point un signe certain de l'existence de l'isomorphisme, elle ne doit pas dispenser de recourir à des preuves plus directes et plus positives pour la constatation du fait; mais elle peut servir auparavant à indiquer sa possibilité; ou bien venir après coup s'ajouter à ces preuves, comme un nouveau moyen de vérification.

§ 3. *Du plésiomorphisme.*

Il existe de nombreux cas où des corps peuvent être isomorphes géométriquement, sans l'être chimiquement ni même physiquement, c'est-à-dire, sans offrir à l'intérieur ni ressemblance de composition chimique, ni analogie de structure réticulaire. Ce genre d'isomorphisme est en quelque sorte purement extérieur, et consiste uniquement en ce que les séries cristallines de ces corps offrent un même ensemble de faces et d'arêtes, dont les directions se correspondent exactement dans le premier système cristallin, ou à peu près dans les autres systèmes. C'est là tout ce qu'il a de commun avec l'isomorphisme ordinaire; il ne suppose pas, comme celui-ci, de relation intime entre les molécules qui composent les corps dont il s'agit, ni de similitude parfaite dans les modes d'assemblage de ces molécules.

Dans un mémoire présenté par moi à l'Académie des sciences en avril 1851, j'ai appelé l'attention des minéralogistes sur la grande généralité de ce fait, que j'ai désigné sous le nom de *plésiomorphisme;* nom qui équivaut à celui d'*homœomorphisme*, dont s'est servi M. Dana, dans plusieurs communications sur le même sujet (1). On avait fait depuis longtemps la remarque que des corps de la nature la plus opposée offrent souvent dans leurs formes le même degré de rapprochement que l'on observe dans celles des corps isomorphes, sans qu'on puisse saisir le moindre rapport entre leurs compositions atomiques, un corps simple pouvant être plésiomorphe avec une combinaison chimique d'un ordre quelconque. Comme exemples de plésiomorphisme bien connus, je citerai ici le soufre, le bisulfate de potasse, et la scorodite; le calcaire spathique, le nitrate de soude et l'argent rouge; l'arragonite, le salpêtre et la bournonite; le quarz et la chabasie; le titane anatase et l'idocrase; le pyroxène augite et le

(1) Voir les *Comptes-Rendus de l'Acad.* (Séance du 14 avril 1851; tome XXXII, p. 535). Ce mémoire, imprimé et distribué seulement à quelques savants de Paris vers la fin de 1851, n'a obtenu ainsi qu'une publication très-restreinte. En 1852, un de mes anciens élèves, M. Ladrey, aujourd'hui professeur à la faculté des sciences de Dijon, a communiqué dans une thèse de nouveaux faits concernant le plésiomorphisme; et M. Dana a traité du même sujet dans une suite de publications commencées en 1854. Ce savant américain n'avait pas connaissance alors de mon travail antérieur; mais depuis, dans le second supplément à sa *Minéralogie*, qui a paru en mars 1856, il s'est empressé de reconnaître mes droits à la priorité sur ce genre d'observations et de recherches.

borax; la prehnite et la manganite; le péridot et la cymophane; les amphiboles et les pyroxènes; et enfin toutes les espèces du groupe des feldspaths.

Le nombre des espèces dans lesquelles le plésiomorphisme apparait par la comparaison directe de leurs formes primitives, est déjà considérable; il s'accroît bien plus encore, si l'on fait porter la comparaison non plus seulement sur les formes adoptées ordinairement comme fondamentales, et dont le choix est toujours plus ou moins arbitraire, mais aussi sur leurs dérivées les plus simples. C'est alors surtout que le phénomène se montre dans toute sa généralité. Le plésiomorphisme se constate soit par le rapprochement immédiat des angles dièdres correspondants, soit par la comparaison des longueurs d'axes, dans les deux formes que l'on met en rapport l'une avec l'autre.

M. Laurent, comme nous l'avons dit ailleurs, a essayé de faire voir que l'isomorphisme proprement dit n'a pas lieu seulement entre les espèces du même système cristallin, mais qu'il peut, en franchissant les limites de ce système, s'étendre aux systèmes voisins, et même parcourir ainsi tous les degrés de l'échelle cristallomorphique. Il en est absolument de même du plésiomorphisme : il établit, pour les espèces qui n'ont pas le même type de composition atomique, un rapprochement tout semblable entre celles qui appartiennent aux derniers systèmes cristallins et celles qui se rapportent aux premiers. Ce rapprochement est dû à certaines formes qu'on peut appeler des formes limites ou de transition, et qui sont telles qu'en modifiant très-légèrement un ou deux de leurs angles, elles passent aux formes des systèmes voisins.

Prenons pour exemple le système orthorhombique. Dans les minéraux qui cristallisent en prismes droits à base rhombe, sur cent quarante espèces bien déterminées, on en compte plus de cinquante qui offrent des prismes hexagonaux dont les angles sont tous à peu près de 120°; elles sont donc non-seulement plésiomorphes entre elles, mais encore avec celles du système hexagonal : ce sont, pour ainsi dire, des cristallisations hexagonales qui auraient été faiblement altérées par des causes perturbatrices. D'un autre côté, on connaît plus de trente autres espèces qui cristallisent en prismes rhombiques, dont les angles diffèrent extrêmement peu de 90° : celles-ci sont plésiomorphes, non-seulement entre elles, mais encore avec les substances qui cristallisent en prismes droits à base carrée. La même chose a lieu pour

les espèces du cinquième système, relativement à celles du quatrième; pour les espèces du troisième et du second système, à l'égard de celles du premier. Par exemple, un grand nombre d'espèces rhomboédriques offrent, parmi leurs formes, une variété de rhomboèdre qu'on peut appeler *cuboïde*, parce qu'elle diffère très-peu du cube par ses angles : par là, ces espèces s'assimilent non-seulement entre elles, mais encore avec les espèces cubiques proprement dites.

On peut se rendre compte du fait dont nous nous occupons en ce moment, en se représentant, avec M. A. Laurent, les différents types moléculaires, qui sont propres au système régulier, comme des types primitifs ou générateurs, d'où les types moléculaires des autres systèmes dériveraient par des substitutions d'atomes de nature variée à des atomes de même espèce, ce mode de remplacement n'ayant d'autre effet que d'altérer légèrement le type primitif dans ses dimensions fondamentales, ce qui suffit néanmoins pour le faire passer dans un autre système.

Le fait de plésiomorphisme, considéré en lui-même et indépendamment des causes qui le produisent, offre de l'importance au point de vue de la chimie et de la minéralogie proprement dite. Avertis de ce fait et de sa grande généralité, les chimistes et les minéralogistes devront se tenir désormais sur leurs gardes, et ne plus se presser de conclure à l'isomorphisme de deux corps qui auront des formes analogues; ils éviteront à l'avenir les méprises dans lesquelles les cristallographes sont tombés souvent, pour n'avoir pas tenu compte suffisamment des petites différences d'angles qui existaient entre les cristaux observés et les formes limites dont ceux-ci se montraient peu éloignés. Haüy, dans ce cas, était toujours tenté de substituer la limite, comme forme plus simple, au résultat réel des observations, et il lui est arrivé souvent de commettre une erreur dans la détermination du système cristallin.

Enfin, le même fait peut servir encore à nous donner la clef de plusieurs phénomènes, jusqu'à présent inexpliqués, comme aussi la valeur de certaines théories ou hypothèses, proposées par des cristallographes et contestées par d'autres.

Haüy, par exemple, avait observé que dans beaucoup de prismes (ceux de l'émeraude, de l'apatite, de l'idocrase, etc.), les pans avaient des dimensions sensiblement égales, en hauteur et en largeur, et dans ce cas, il ne manquait jamais de leur attribuer la forme du carré. Il avait cru remarquer aussi, dans les

prismes obliques à base rhombe, une relation géométrique très-simple (1), qui, admise par lui comme exacte, lui servait à limiter la hauteur de ces prismes. D'un autre côté, MM. Weiss, Mohs et Breithaupt ont soutenu l'opinion que tous les cristaux connus pouvaient être rapportés à des systèmes d'axes rectangulaires, ce qui devait avoir pour effet de réduire à quatre le nombre des systèmes cristallins. MM. Naumann et Wallmark ont cru apercevoir dans beaucoup d'espèces des relations fort simples de grandeur entre les axes d'une même forme fondamentale (2). Enfin, M. Breithaupt, par un procédé auquel il a donné le nom de *dérivation progressionnelle*, a prétendu déduire de l'octaèdre régulier toutes les formes primitives d'un autre système, par exemple tous les octaèdres du système quadratique, en composant les axes de ceux-ci d'un nombre plus ou moins grand de parties de l'axe de l'octaèdre régulier, qu'il suppose d'abord partagé en un grand nombre de parties aliquotes, savoir 720 (3). Il est évident que tous ces faits s'expliquent aisément par le plésiomorphisme, et qu'il ne faut point y voir des vérités absolues, mais seulement des lois approximatives. M. Breithaupt a cru pouvoir donner de sa théorie de dérivation progressive, une preuve *à posteriori*, en se fondant sur l'accord des résultats qui s'en déduisent avec ceux de l'observation directe. Il en est de cette prétendue démonstration expérimentale, comme de celle qu'on a donnée en chimie de la loi de Prout, d'après laquelle tous les poids atomiques des éléments seraient des multiples du poids de l'hydrogène; l'accord qu'on suppose exister vient uniquement de ce que l'on a pris une unité assez petite pour que l'erreur commise, en négligeant les fractions de cette unité, reste toujours au-dessous de celle qui est due à l'observation même.

(1) Cette relation consiste en ce que si l'on mène une droite de l'extrémité supérieure de l'arête située en avant, à l'extrémité inférieure de l'arête opposée, cette droite est perpendiculaire sur l'une et sur l'autre. (Haüy, *Traité de Cristallog.*, 2e vol., p. 72.)

(2) Naumann, *Lehrbuch der Mineralogie*, aux articles concernant les espèces rhombiques et klinorhombiques. — Wallmark, second supplément au *Dictionnaire de Chimie minéralogique* de Rammelsberg.

(3) *Handbuch der Mineralogie*, 1er vol., p. 265.

APPENDICE
AU PREMIER VOLUME.

En divers endroits de ce volume, j'ai renvoyé à un appendice final, pour tous les points relatifs à la forme, à la structure ou à la physique des cristaux, dont les développements exigent l'emploi du calcul algébrique ou trigonométrique. Je me propose de traiter ici en peu de mots de ceux de ces points qui me paraissent offrir le plus d'importance; et je commencerai par la démonstration du théorème fondamental qui résume toute la théorie de Haüy, et dont l'énoncé se trouve à la page 286.

1. *Démonstrations analytique et synthétique de la loi fondamentale de la cristallographie, dite loi de rationnalité.*

Nous avons vu, p. 293, que si l'on prend pour centre d'un réseau cristallin un quelconque des points matériels dont il se compose, et pour axes cristallographiques trois rangées moléculaires, choisies parmi celles qui passent par ce point sans être situées dans le même plan, et sur lesquelles les distances des molécules aient des valeurs *minima*, ces axes se trouveront partagés en parties d'égale longueur ou *paramètres;* et si l'on mène des plans par trois quelconques des points de division, pris en même temps sur les trois axes, on obtiendra ainsi tous les plans du système cristallin. Il est évident que, si l'on regarde les trois axes cristallographiques comme des axes de coordonnées x, y, z, chacun de ces plans sera représenté par une équation aux paramètres $\frac{x}{ma}+\frac{y}{nb}+\frac{z}{pc}=1$, équivalente au symbole $(ma:nb:pc)$ dont font usage les cristallographes, et dans laquelle m, n, p sont des nombres entiers, positifs ou négatifs.

De ce mode simple et uniforme de génération, on tire la con-

séquence que tous les plans du système coupent chacun des axes fondamentaux dans des rapports rationnels; mais cette loi de rationnalité existe encore par toute autre ligne cristallographique, c'est-à-dire pour tous les axes qu'on obtiendrait en joignant successivement le point central à tous les autres points du réseau. Haüy a pressenti cette extension de la loi des troncatures rationnelles, comme il résulte de ses idées sur les noyaux hypothétiques; mais il s'est contenté de la vérifier par quelques applications directes. J'ai le premier énoncé positivement cette loi générale en 1825, dans un article des *Annales des sciences naturelles*, où je passais en revue les divers systèmes de notation usités en cristallographie (1). On l'y trouvera présentée sous la forme d'un théorème, dans les termes suivants : « Un système de plans cris-» tallins étant donné par trois axes, subdivisés chacun en para-» mètres égaux, il existe une infinité d'autres systèmes d'axes qui » peuvent le reproduire, par la subdivision de chacun d'eux en » de nouveaux paramètres. » J'étais parvenu à démontrer ce théorème, au moyen des formules ordinaires de la transformation des coordonnées, en y introduisant la condition que les nouveaux axes fussent des lignes cristallographiques quelconques, menées par l'origine. Mais j'avais cru devoir supprimer cette démonstration dans l'article dont j'ai parlé, la nature du journal ne me paraissant pas comporter les développements de calcul qu'elle eût exigés.

Cette généralisation de la loi des troncatures rationnelles a dû naturellement s'offrir à l'esprit de beaucoup de cristallographes; toutefois, ce n'est qu'en 1831 qu'on en trouve la première démonstration formelle dans le Traité de Crystallonomie du docteur Kupffer; d'autres démonstrations de la même loi ont été publiées successivement, par le docteur Frankenheim dans le Journal de Crelle, en 1832 ; par M. Miller dans son Traité de Cristallographie, en 1839; par M. de Sénarmont, en 1842, dans la traduction française du même ouvrage; par M. A. Bravais, en 1850, dans ses Etudes cristallographiques; et enfin, par M. Naumann, en 1856, dans la dernière édition de ses Eléments de Cristallographie.

Ces diverses démonstrations, remarquables par leur élégance, présentent généralement ce caractère de complication, qui ne permet guère de les admettre dans des traités élémentaires. En les comparant avec celle à laquelle j'étais arrivé de mon côté

(1) *Annales des Sciences naturelles*, tome VI, p. 121.

en 1825, j'ai cru m'apercevoir que celle-ci avait sur elles l'avantage de la brièveté et de la simplicité, et c'est ce qui me détermine à la donner ici, avant de faire connaître les résultats plus simples encore, auxquels je suis parvenu en suivant une marche purement synthétique.

THÉORÈME. — Un système de plans cristallins étant donné par trois axes, subdivisés chacun en paramètres égaux, il existe une infinité d'autres systèmes d'axes, qui peuvent le reproduire par la subdivision de chacun des nouveaux axes en paramètres. Pour les obtenir, il suffit de prendre sur les axes, à partir de l'origine, trois multiples quelconques des paramètres fondamentaux, et de les composer entre eux, comme on compose en mécanique trois forces de directions différentes, d'après la règle du parallélipipède des forces : on aura de cette manière un paramètre résultant et en même temps un nouvel axe ; et l'on se procurera ainsi autant d'axes qu'on voudra, avec leurs paramètres correspondants, en variant les multiples des anciens paramètres.

Soit $\frac{x}{ma}+\frac{y}{nb}+\frac{z}{pc}=1 \ldots (1)$ l'équation générale des plans du système, a, b, c étant des quantités constantes qui représentent les paramètres primitifs, et m, n, p des quantités variables, mais toujours rationnelles.

Pour passer du premier système d'axes x, y, z à un autre système d'axes obliques X, Y, Z, on a les formules générales :

$$\left.\begin{aligned} x &= \alpha_1 X + \alpha_2 Y + \alpha_3 Z \\ y &= \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_3 Z \\ z &= \gamma_1 X + \gamma_2 Y + \gamma_3 Z \end{aligned}\right\} (2);$$

et si l'on divise la première des équations (2) par ma, la seconde par nb, la troisième par pc, et qu'on ajoute ensuite les membres correspondants, en tenant compte de l'équation (1), x, y, z seront éliminés, et l'on aura pour l'équation générale des plans rapportés aux nouveaux axes,

$$\left(\frac{\alpha_1}{ma}+\frac{\beta_1}{nb}+\frac{\gamma_1}{pc}\right)X+\left(\frac{\alpha_2}{ma}+\frac{\beta_2}{nb}+\frac{\gamma_2}{pc}\right)Y+\left(\frac{\alpha_3}{ma}+\frac{\beta_3}{nb}+\frac{\gamma_3}{pc}\right)Z=1. \quad (3)$$

Il reste à faire voir que cette équation pourra se ramener à la forme

$$\frac{X}{MA}+\frac{Y}{NB}+\frac{Z}{PC}=1,$$

A, B, C étant des constantes, et M, N, P des quantités variables rationnelles, si les nouveaux axes sont des lignes cristallographi-

ques, c'est-à-dire si chacun d'eux, passant déjà à l'origine par un des nœuds du réseau cristallin, passe en outre par un second nœud, savoir : l'axe des X par le point dont les coordonnées sont $m'a, n'b, p'c$, l'axe des Y par le point $m''a, n''b, p''c$, et l'axe des Z par le point $m'''a, n'''b, p'''c$.

Représentons par A, B, C les distances de ces trois points au centre commun des deux systèmes. Le premier point étant sur l'axe des X, ses nouvelles coordonnées seront $X=A$, $Y=o$, $Z=o$, tandis que les anciennes sont $x=m'a, y=n'b, z=p'c$. Les équations (2) deviendront donc :

$$m'a = \alpha_1 A,\quad n'b = \beta_1 A,\quad p'c = \gamma_1 A,$$

d'où l'on tirera :

$$\alpha_1 = \frac{m'a}{A},\quad \beta_1 = \frac{n'b}{A},\quad \gamma_1 = \frac{p'c}{A}.$$

On aura de même :

$$\alpha_2 = \frac{m''a}{B},\quad \beta_2 = \frac{n''b}{B},\quad \gamma_2 = \frac{p''c}{B},$$

et

$$\alpha_3 = \frac{m'''a}{C},\quad \beta_3 = \frac{n'''b}{C},\quad \gamma_3 = \frac{p'''c}{C}.$$

Substituant ces valeurs dans l'équation (3), et faisant, pour simplifier,

$$M = \frac{1}{\frac{m'}{m}+\frac{n'}{n}+\frac{p'}{p}},\quad N = \frac{1}{\frac{m''}{m}+\frac{n''}{n}+\frac{p''}{p}},\quad P = \frac{1}{\frac{m'''}{m}+\frac{n'''}{n}+\frac{p'''}{p}}.$$

L'équation (3) deviendra :

$$\frac{X}{MA} + \frac{Y}{NB} + \frac{Z}{PC} = 1,$$

dans laquelle A, B, C sont des quantités constantes, qui dépendent à la fois des anciens paramètres a, b, c et des angles que les nouveaux axes font avec les premiers, et où M, N, P sont des quantités variables, mais toujours rationnelles, puisqu'elles ne dépendent que des caractéristiques, m, n, p; m', n', p', etc. Donc, etc.

Le calcul précédent me paraît assez simple, pour pouvoir être admis dans les traités spéciaux de minéralogie, et surtout dans ceux de cristallographie proprement dite ; cependant il offre encore l'inconvénient de supposer la connaissance des formules de la géométrie analytique et de la transformation générale des coordonnées. Or, j'ai montré, dans un mémoire présenté, en

1856, à l'Académie des Sciences (1), qu'il est possible de résoudre la même question, et de plus d'opérer à volonté un changement soit partiel, soit complet, d'axes et de paramètres, ce qui est un point important en cristallographie, sans recourir à cet appareil de formules analytiques, et par des moyens purement géométriques, à la portée de tout le monde. J'ai obtenu ce résultat, en prenant pour point de départ une proposition anciennement établie par moi dans le second volume de la *Cristallographie* de Haüy (p. 230), et m'appuyant ensuite sur quelques autres propositions qui se déduisent de la première.

PROBLÈME. — Etant données les valeurs relatives des segments déterminés sur les côtés d'un parallélogramme par une sécante, ou dans ceux d'un parallélipipède par un plan sécant, trouver la valeur relative du segment correspondant à la diagonale du parallélogramme ou du parallélipipède. Par la valeur relative d'un segment, nous entendons ici le rapport entre la longueur de ce segment et celle de la ligne entière dont il est détaché.

1° Pour le *parallélogramme*. Soient (fig. 82, pl. XVIII) m, n les valeurs relatives des segments Op, Oq, déterminés par la sécante pq, c'est-à-dire les rapports $\frac{Op}{OA}$, $\frac{Oq}{OB}$; représentons par x la valeur cherchée du segment Or, ou le rapport $\frac{Or}{OR}$. A cause des triangles semblables prs, Orq, on a :

$$\frac{ps}{Oq} = \frac{Os - Or}{Or};$$

en divisant les deux termes de la première fraction par OB, ceux de la seconde par OR, et observant que $\frac{ps}{\text{OB ou AR}}$ et $\frac{Os}{OR}$ égalent $\frac{Op}{OA}$, on aura :

$$\frac{m}{n} = \frac{m - x}{x}, \quad \text{d'où l'on tire } x = \frac{mn}{m + n} \quad (1)$$

équation que l'on peut mettre sous la forme :

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{m} + \frac{1}{n} \dots \text{(A)}.$$

(1) Sur un moyen de résoudre synthétiquement plusieurs des principales questions de cristallographie (*Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, du 7 juillet 1856, p. 32).

(1) L'équation $x = \frac{mn}{m+n}$ peut servir à calculer la relation qui existe entre les valeurs relatives des quatre segments Am, An, Ap, Aq, déterminés par un

2° Pour le *parallélipipède*. Soit mnp le plan sécant (fig. 84). Dans le parallélogramme extérieur OASC, on a, d'après la formule précédente et en représentant par s la valeur du segment diagonal Os,

$$\frac{1}{s}=\frac{1}{m}+\frac{1}{p}.$$

Dans le parallélogramme intérieur OBRS, dont la diagonale se confond avec celle du parallélipipède, on a, en appelant r la valeur du segment cherché Or,

$$\frac{1}{r}=\frac{1}{s}+\frac{1}{n}.$$

de là on conclut :

$$\frac{1}{r}=\frac{1}{m}+\frac{1}{n}+\frac{1}{p}\ldots\text{(B)}.$$

Corollaire. — Si le plan de troncature est transporté parallèlement à lui-même, jusqu'à ce qu'il passe par l'extrémité de la diagonale OR, auquel cas il rencontre les côtés du parallélipipède prolongés, au-delà de leurs extrémités, on a alors $r=1$; m, n, p ont des valeurs plus grandes que l'unité, et la formule précédente devient

$$1=\frac{1}{m}+\frac{1}{n}+\frac{1}{p}\ldots\text{(C)}.$$

A l'aide de ces formules très-simples (B) et (C), on peut démontrer facilement ce théorème : *Un axe cristallographique quelconque est coupé dans des rapports rationnels par tous les plans*

plan de troncature sur les arêtes d'un octaèdre (fig. 83), relation qu'il est nécessaire de connaître, lorsqu'on veut appliquer la théorie des décroissements à une forme octaédrique (Voyez la *Cristallographie* de Haüy, 2e vol., p. 231). Représentons par m, n, p, q les valeurs relatives de ces quatre arêtes, et par x celle du segment Ao, détaché de l'axe de la pyramide. mon étant une ligne droite, les trois segments Am, Ao, An seront liés entre eux par l'équation $x=\frac{mn}{m+n}$.

La même dépendance existera entre les segments Ap, Ao et Aq, et on aura pareillement $x=\frac{pq}{p+q}$.

Donc, en combinant ces deux résultats, on a

$$\frac{m+n}{m+n}=\frac{pq}{p+q},$$

équation qu'on peut mettre sous la forme

$$\frac{1}{m}+\frac{1}{n}=\frac{1}{p}+\frac{1}{q}.$$

d'un système cristallin. Il est facile en effet de déterminer la valeur relative du segment formé par le plan de troncature mnp, sur toute droite cristallographique (axe ou arête) passant par le point O.

Soit Ox, Oy, Oz (fig. 85) les axes fondamentaux; a, b, c les paramètres qui leur correspondent, c'est-à-dire les longueurs constantes par lesquelles on doit diviser respectivement les segments OM, ON, OP pour avoir leurs valeurs relatives, en sorte que $OM=ma$, $ON=nb$, $OP=pc$; et soit OX un autre axe cristallographique quelconque.

La condition qui en fait une ligne de ce genre, est que, passant déjà par un des points O du réseau cristallin, il doit en même temps passer par un second point du réseau, tel que Q, et dont les coordonnées (c'est-à-dire les côtés du parallélipipède construit sur les axes primitifs et qui a son sommet en Q) auront pour expressions $m'a$, $n'b$, $p'c$, dans lesquelles $m'n'p$ sont des qualités rationnelles.

Soit R le point d'intersection de l'axe OX et du plan MNP, qui à pour signe cristallographique $(ma:nb:pc)$. Cherchons la valeur du segment ou nouveau paramètre OR, en fonction de OQ et des coëfficients rationnels mnp et $m'n'p'$.

Le point R étant sur la droite OQ, les coordonnées du point R seront celles du point Q réduites dans la proportion de OQ à OR. On aura donc, en désignant par x', y', z' les coordonnées de R,

$$x'=m'a\cdot\frac{OR}{OQ},\quad y'=n'b\cdot\frac{OR}{OQ},\quad z'=p'c\cdot\frac{OR}{OQ}.$$

D'un autre côté, le point R étant sur le plan MNP, les coordonnées de R forment un parallélipipède dont OR est la diagonale, et le plan MNP est, à l'égard des axes et de ce parallélipipède, un plan de troncature passant par l'extrémité de la diagonale. La formule (C) $1=\frac{1}{m}+\frac{1}{n}+\frac{1}{p}$, dans laquelle m, n, p représentent les valeurs relatives des trois segments OM, ON, OP, est donc applicable à ce cas. Or, ces valeurs relatives sont:

$$\frac{OM}{x'},\ \frac{ON}{y'},\ \frac{OP}{z'};$$

donc, on a:

$$1=\frac{x'}{OM}+\frac{y'}{ON}+\frac{z'}{OP}=\left(\frac{m'}{m}+\frac{n'}{n}+\frac{p'}{p}\right)\frac{OR}{OQ};$$

d'où l'on tire

$$\frac{OR}{OQ}=\frac{1}{\frac{m'}{m}+\frac{n'}{n}+\frac{p'}{p}} \cdots \text{(D)}.$$

On voit que ce rapport sera toujours rationnel, puisque m, n, p et m', n', p' le sont pareillement.

De là se conclut immédiatement la loi des troncatures rationnelles, envisagée dans toute sa généralité. En effet, OX nous représente un axe cristallographique quelconque mené par l'origine, puisque le second point Q, qui le détermine, est un point quelconque du réseau cristallin ; et l'on voit que si l'on subdivise cet axe en parties égales à OQ, et que l'on évalue ensuite, au moyen de cette unité paramétrique, tous les segments tels que OR, formés sur cet axe par les divers plans du système, les valeurs relatives de ces segments auront pour expression générale $\frac{1}{\frac{m'}{m}+\frac{n'}{n}+\frac{p'}{p}}$, et seront par conséquent rationnelles.

OQ nous représente l'intervalle compris entre une molécule quelconque de la rangée OX et la molécule centrale ; c'est la diagonale du parallélipipède construit sur les axes Ox, Oy, Oz, avec des arêtes égales à $m'a$, $n'b$, $p'c$. Sa valeur est une fonction connue de ces trois arêtes et des cosinus des angles que font entre eux les axes primitifs; mais, pour la démonstration du théorème que nous avons en vue, il n'est pas nécessaire de la déterminer : il suffit de savoir qu'elle est constante par rapport à tous les plans du système. Si on la désigne par A, et si l'on représente en même temps par M la quantité $\frac{1}{\frac{m'}{m}+\frac{n'}{n}+\frac{p'}{p}}$, tous les segments tels que OR, détachés de l'axe OX par les divers plans du système, auront pour expression M A, dans laquelle A est une longueur constante qu'on peut regarder comme un nouveau paramètre fondamental, et M est une quantité numérique variable et toujours rationnelle.

Ceci posé, si l'on veut opérer un changement complet d'axes et de paramètres, rien n'est plus facile. (ma, nb, pc) étant toujours le signe d'un plan quelconque du système, rapporté aux axes primitifs Ox, Oy, Oz, quel sera le signe général de ce plan, rapporté à trois nouveaux axes OX, OY, OZ, choisis arbitrairement parmi toutes les arêtes ou lignes cristallographiques du système, et déterminés par la condition de passer, le premier

par le point $(m'a, n'b, p'c)$, le second par le point $(m''a, n''b, p''c)$, et le troisième par le point $(m'''a, n'''b, p'''c)$? D'après les calculs précédents, les trois nouveaux paramètres fondamentaux seront les diagonales A, B, C, des parallélipipèdes construits sur les anciens axes, avec les coordonnées de ces trois points, prises pour arêtes; et le nouveau signe sera évidemment

$$\left(\frac{1}{\frac{m'}{m}+\frac{n'}{n}+\frac{p}{p'}}A : \frac{1}{\frac{m''}{m}+\frac{n''}{n}+\frac{p''}{p}}B : \frac{1}{\frac{m'''}{m}+\frac{n'''}{n}+\frac{p'''}{p}}C\right)$$

2. *Démonstration synthétique de la loi des zônes.*

On a vu (p. 97) que les trois paramètres secondaires, qui déterminent la position d'un plan cristallin et forment les éléments de son signe, peuvent être dérivés des paramètres fondamentaux de deux manières : ou par les multiples de ces paramètres, ou par leurs sous-multiples. Tous les plans d'un système, sans exception, peuvent être représentés aussi bien par le signe général $(ma : nb : pc)$, dans lequel m, n, p sont des nombres entiers, dont un ou deux peuvent devenir infinis, mais jamais nuls, que par le signe $\left(\frac{1}{m} a : \frac{1}{n} b : \frac{1}{p} c\right)$, dans lequel m, n, p, sont encore des nombres entiers, dont un ou deux peuvent devenir nuls, mais jamais infinis. Nous adopterons maintenant le second signe, parce qu'il simplifie beaucoup les formules de la théorie des zônes.

L'équation de condition, qui lie entre elles les caractéristiques de trois faces comprises dans une même zône (p. 179), est facile à déterminer. Supposons, comme le fait M. Quenstedt dans sa méthode graphique, que toutes les faces de la zône passent par un point I (fig. 86, pl. XVIII), situé sur l'axe des z, à l'unité de distance paramétrique : chaque face de la zône pourra être représentée par un signe de la forme $\left(\frac{1}{\mu} a : \frac{1}{\nu} b : c\right)$. Toutes les faces de la zône auront pour intersection commune une droite IP, qui sera l'*axe de zône*, et le point P, où cette droite rencontrera le plan des deux autres axes, sera le *point de zône*, d'où rayonneront les traces des différents plans.

Soient MN, M'N', M''N'' trois de ces traces; désignons par $\frac{a}{\mu}, \frac{a}{\mu'}, \frac{a}{\mu''}$ les paramètres OM, OM', OM''; par $\frac{b}{\nu}, \frac{b}{\nu'}, \frac{b}{\nu''}$ les

paramètres ON, ON', ON''; et enfin, par $\frac{a}{\alpha}$ et $\frac{b}{\beta}$ les coordonnées du point commun P.

Les triangles semblables MNO, MPA donnent la proportion :

$$\frac{\mathrm{OM}}{\mathrm{AM}} \text{ ou } \frac{\mathrm{OM}}{\mathrm{OM}-\mathrm{OA}}=\frac{\mathrm{ON}}{\mathrm{AP} \text{ ou } \mathrm{OB}};$$

ou bien, en faisant les substitutions et simplifiant,

$$\frac{\mu}{\alpha}+\frac{\nu}{\beta}=1,$$

ou

$$\beta\mu+\alpha\nu\ \alpha\beta \ldots (1).$$

On aurait de même, pour les autres lignes de section :

$$\beta\mu'+\alpha\nu'=\alpha\beta$$
$$\beta\mu''+\alpha\nu''=\alpha\beta,$$

et par suite :

$$\left.\begin{array}{l}\beta\mu+\alpha\nu=\beta\mu'+\alpha\nu' \\ \beta\mu+\alpha\nu=\beta\mu''+\alpha\nu''\end{array}\right\} \text{ou} \left\{\begin{array}{l}\beta(\mu-\mu')=\alpha(\nu'-\nu) \\ \beta(\mu-\mu'')=\alpha(\nu''-\nu)\end{array}\right.$$

et, en divisant les deux équations l'une par l'autre :

$$\frac{\mu-\mu'}{\mu-\mu''}=\frac{\nu-\nu'}{\nu-\nu''} \ldots (2)$$

c'est l'équation de zône sous sa forme la plus simple.

Si l'on veut revenir au signe général $\left(\frac{1}{m}a : \frac{1}{n}b : \frac{1}{p}c\right)$, qui équivaut à $\left(\frac{p}{m}a : \frac{p}{n}b : c\right)$, il faudra poser $\mu=\frac{m}{p}$, $\nu=\frac{p}{n}$, et ainsi de suite; et alors l'équation précédente deviendra :

$$\frac{\frac{m}{p}-\frac{m'}{p'}}{\frac{m}{p}-\frac{m''}{p''}}=\frac{\frac{n}{p}-\frac{n'}{p'}}{\frac{n}{p}-\frac{n''}{p''}} \text{ (3)};$$

ou bien :

$$\mathrm{M}\frac{m}{p}+\mathrm{N}\frac{n}{p}=\mathrm{P} \ldots (4)$$

en faisant, pour abréger :

$$\left.\begin{array}{l}\mathrm{M}=n'p''-n''p' \\ \mathrm{N}=p'm''-p''m' \\ \mathrm{P}=m''n'-m'n''\end{array}\right. \quad (5)$$

Si la face (m, n, p) fait partie d'une autre zône (m'', n'', p''), on aura une seconde équation de même forme :

$$\mathrm{M}'\frac{m}{p}+\mathrm{N}'\frac{n}{p}=\mathrm{P}' \ldots (6),$$

dans laquelle

$$\left.\begin{aligned} M' &= n'''p^{\text{iv}} - n^{\text{iv}}p''' \\ N' &= p'''m^{\text{iv}} - p^{\text{iv}}m''' \\ P' &= m^{\text{iv}}n''' - m'''n^{\text{iv}} \end{aligned}\right\} \quad (7).$$

Des deux équations (4) et (6) on déduit :

$$\frac{m}{p} = \frac{PN' - P'N}{MN' - M'N}$$

$$\frac{n}{p} = \frac{MP' - M'P}{MN' - M'N}$$

ce qui permet de poser :

$$\left.\begin{aligned} m &= PN' - P'N \\ n &= MP' - M'P \\ p &= MN' - M'N \end{aligned}\right\} \quad (8).$$

Ce sont les équations données page 180, et qui fournissent immédiatement les valeurs des indices m, n, p, sans qu'on ait besoin de résoudre les équations de zône dans chaque cas particulier.

3. *De la Tautométrie.*

Nous avons mentionné sous ce nom, page 181 de cet ouvrage, une propriété qui est une conséquence des deux lois fondamentales de la cristallographie, la loi de rationnalité et la loi des zônes, mais qui ne se manifeste que sous une condition particulière, laquelle, à la vérité, se réalise très-fréquemment. Cette propriété est utile à connaître, en ce qu'elle permet de calculer directement, les unes par les autres, les inclinaisons mutuelles des faces tautozonaires, c'est-à-dire de celles qui sont comprises dans une même zône : elle consiste, en effet, en ce que les tangentes trigonométriques de ces angles dièdres sont multiples l'une de l'autre; par conséquent, la loi des multiples et le moyen simple de calcul qui en résulte s'étendent alors jusqu'aux angles eux-mêmes, en tant du moins qu'on les suppose représentés par leurs tangentes.

Cette propriété n'existe que pour les zônes, dont le plan normal contient deux axes cristallographiques perpendiculaires l'un à l'autre. Dans ce cas, si l'on suppose les différents plans de la zône transportés parallèlement à eux-mêmes, jusqu'à ce qu'ils passent par un même point de l'un des deux axes rectangulaires, ces plans couperont le second axe dans des rapports rationnels : or, il est aisé de voir que les différents segments sont précisément les tangentes des inclinaisons de ces plans sur le premier axe, ou, ce qui revient au même, sur celui des plans qui passe par cet axe et par l'axe même de la zône.

4. *Du calcul des angles formés par des faces dont les signes cristallographiques sont donnés.*

Le calcul des inclinaisons mutuelles des faces secondaires, soit d'un même ordre, soit de différents ordres, est un des objets les plus importants de la cristallographie pratique. Les signes qui expriment la loi de génération de chaque face, contiennent toutes les données nécessaires à la solution des questions de ce genre, et l'on parvient à les résoudre par deux méthodes différentes, par les formules de la géométrie analytique, ou par celles de la trigonométrie sphérique.

1° *Méthode analytique.* — La première méthode, celle qui se fonde sur l'analyse de Descartes, offre cela d'avantageux, qu'elle fournit des formules applicables à tous les cas, et qui donnent immédiatement, par de simples substitutions, l'angle de deux faces quelconques dont la génération est connue. L'emploi de cette méthode se présente naturellement à l'esprit, si l'on se rappelle que tout symbole cristallographique, tel que $(ma:nb:pc)$ équivaut à l'équation $\frac{x}{ma}+\frac{y}{nb}+\frac{z}{pc}=1$, laquelle est celle du plan de la face que l'on considère, rapporté aux axes sur lesquels se comptent les paramètres. Or, la géométrie analytique conduit à exprimer le cosinus de l'angle des deux plans, dont les équations sont données, en fonction des coëfficients des termes de ces équations. C'est M. Lamé qui, le premier, a indiqué ce moyen aux cristallographes dans un des numéros des *Annales des Mines* (1), et il a été suivi dans cette voie par un grand nombre de cristallographes, entre autres par MM. Kupffer, Naumann, Frankenheim et A. Bravais.

En prenant pour axes de coordonnées, les trois axes de cristallisation auxquels se rapportent les signes $(ma:nb:pc)$, et $(m'a:n'b:p'c)$ de deux faces quelconques, et en supposant d'abord que les trois axes soient rectangulaires, on aura pour représenter le cosinus de l'angle dièdre formé par ces faces, la formule bien connue

$$\text{Cos. W}=\frac{\frac{1}{mm'.a^2}+\frac{1}{nn'.b^2}+\frac{1}{pp'.c^2}}{\sqrt{\frac{1}{m^2a^2}+\frac{1}{n^2b^2}+\frac{1}{p^2c^2}}\sqrt{\frac{1}{m'^2a^2}+\frac{1}{n'^2b^2}+\frac{1}{p'^2c^2}}} \quad \text{(A)}$$

(1) Voyez le Mémoire qui a pour titre : *Sur une nouvelle manière de ca-*

laquelle donnera immédiatement la valeur du cosinus, par la substitution des nombres qui expriment les valeurs des paramètres fondamentaux a, b, c, et des coëfficients paramétriques m, n, p; $m' n' p'$.

Cette formule est, comme on le voit, très-simple et très-praticable; mais elle suppose qu'on a choisi un système d'axes rectangulaires, ce qui est toujours possible dans les quatre premiers systèmes cristallins. On appréciera les avantages de cette formule, si l'on fait attention que plus des deux tiers des substances minérales connues se rapportent à ces systèmes, et que par conséquent elle est à leur égard d'une application immédiate.

La géométrie analytique donne les moyens de généraliser cette formule et de l'étendre au cas où les axes de cristallisation sont obliques et font entre eux des angles α, β et γ. Mais alors, au lieu des trinomes qui composent le second membre de l'équation (A), on a des polynomes plus complexes, comprenant chacun trois termes multipliés respectivement par cos α, cos β et cos γ: la formule devient si compliquée, qu'il est rare qu'on en fasse usage; on préfère dans ce cas avoir recours à la seconde méthode (la méthode trigonométrique), excepté peut-être pour les formes du cinquième système, où deux des cosinus précédents deviennent nuls, ce qui simplifie beaucoup la formule. Nous ne croyons pas devoir transcrire ici la nouvelle formule, dans toute sa généralité. Nous nous bornerons à signaler son existence, et l'avantage précieux qu'elle offrirait, aussi bien que la formule (A), de n'exiger aucune construction, et rien de plus que des substitutions de valeurs numériques, fournies uniquement par les symboles des deux faces. Nous ajouterons que, pour appliquer cette formule générale aux formes cristallines d'une substance particulière, il suffira de calculer une fois pour toutes les facteurs des différents termes, qui se composent des constantes a^2, b^2, c^2 et cos α, cos β, cos γ; ces facteurs deviendront des coëfficients numériques, qui ne multiplieront plus que des quantités variables, fonctions très-simples des coëfficients paramétriques m, n, p, et $m' n' p'$. On aura alors le cosinus de l'angle cherché, au moyen de trois logarithmes.

2° *Méthode trigonométrique*. Cette méthode, dans le cas le plus général et par conséquent le plus compliqué, consiste à calculer l'angle que l'on cherche au moyen d'une série de triangles,

culer les angles des cristaux, par M. G. Lamé, ingénieur des mines (*Annales des Mines*, tome IV, p. 69).

les uns rectilignes, les autres sphériques, qui s'enchaînent l'un à l'autre, et dont on calcule successivement un angle au moyen de tables trigonométriques.

Soient Ox, Oy, Oz (fig. 87) trois axes de cristallisation, faisant entre eux des angles quelconques α, β, γ; et soient ABC, A'B'C' deux faces secondaires, qu'on peut toujours amener à passer par un même point A de l'axe Oz. La droite AI sera l'intersection de ces deux plans, et il s'agit de calculer l'angle dièdre BAIB' qu'ils forment entre eux.

Les traces que forment les deux faces sur le plan fondamental zOy, sont AB et AB'. Désignons par μ, et μ' les angles que font ces traces avec l'axe Oz. Au moyen des triangles rectilignes AOB, AOB', dans lesquels on connaît un angle (γ), ainsi que les côtés qui le comprennent et qui sont les paramètres des deux faces, on pourra calculer successivement les angles μ et μ', et on connaîtra l'angle Σ, égal à leur différence $\mu'-\mu$. Au moyen de deux triangles sphériques, il sera facile de calculer ensuite les angles dièdres X et X', formés par chacune des faces avec le plan primitif zOy. Cela fait, on parviendra à calculer l'angle cherché, qui est l'angle dièdre π, en résolvant un cinquième triangle, le triangle sphérique $\pi XX'$, dans lequel on connaîtra deux angles ($180^\circ-X$) et X', et le côté compris Σ égal à $\mu'-\mu$. On a dans ce triangle

$$\text{Cos}\,\Sigma=\frac{\cos\pi+\cos X\cos X'}{\sin X\sin X'},$$

d'où l'on déduit

$$\text{Cos}\,\pi=\cos\Sigma\cdot\sin X\sin X'-\cos X\cos X'.$$

Si l'on fait $\cot\varphi=\cos\Sigma\cdot\tang X'$, on aura enfin

$$\cos\pi=\cos X'\cdot\frac{\sin(X-\varphi)}{\sin\varphi},$$

formule calculable par logarithmes.

FIN DU TOME PREMIER.

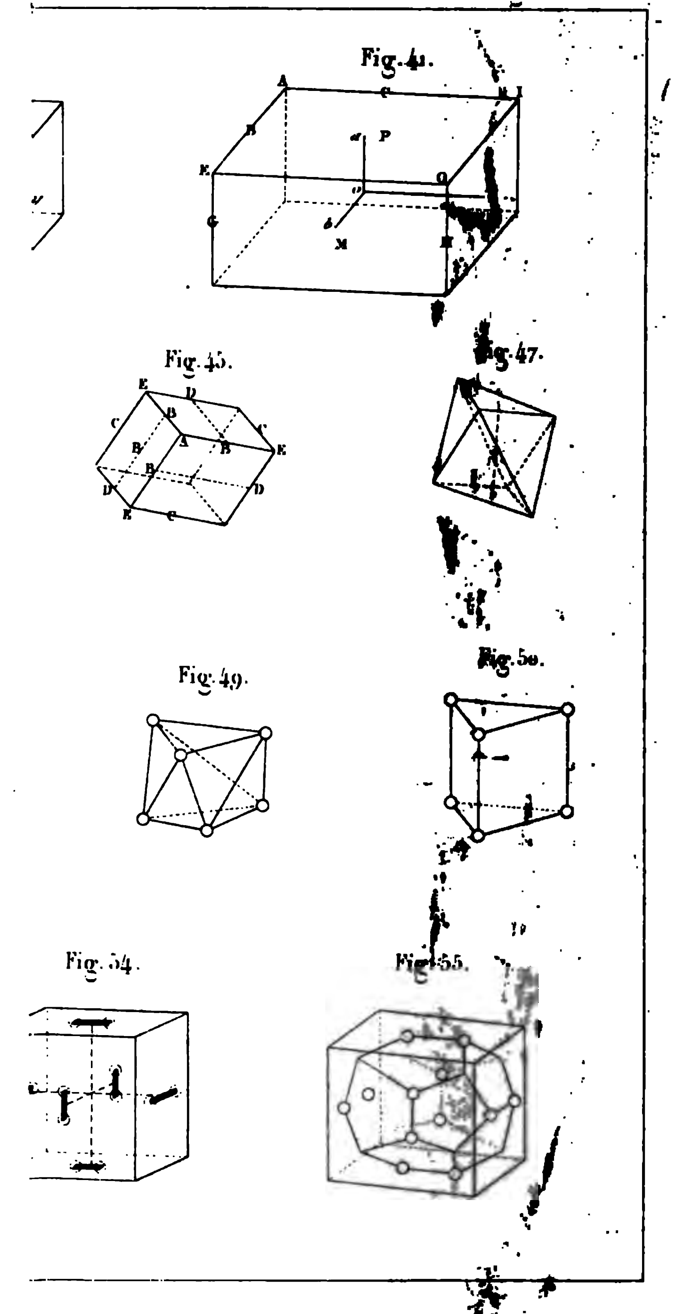
TABLE DES MATIÈRES

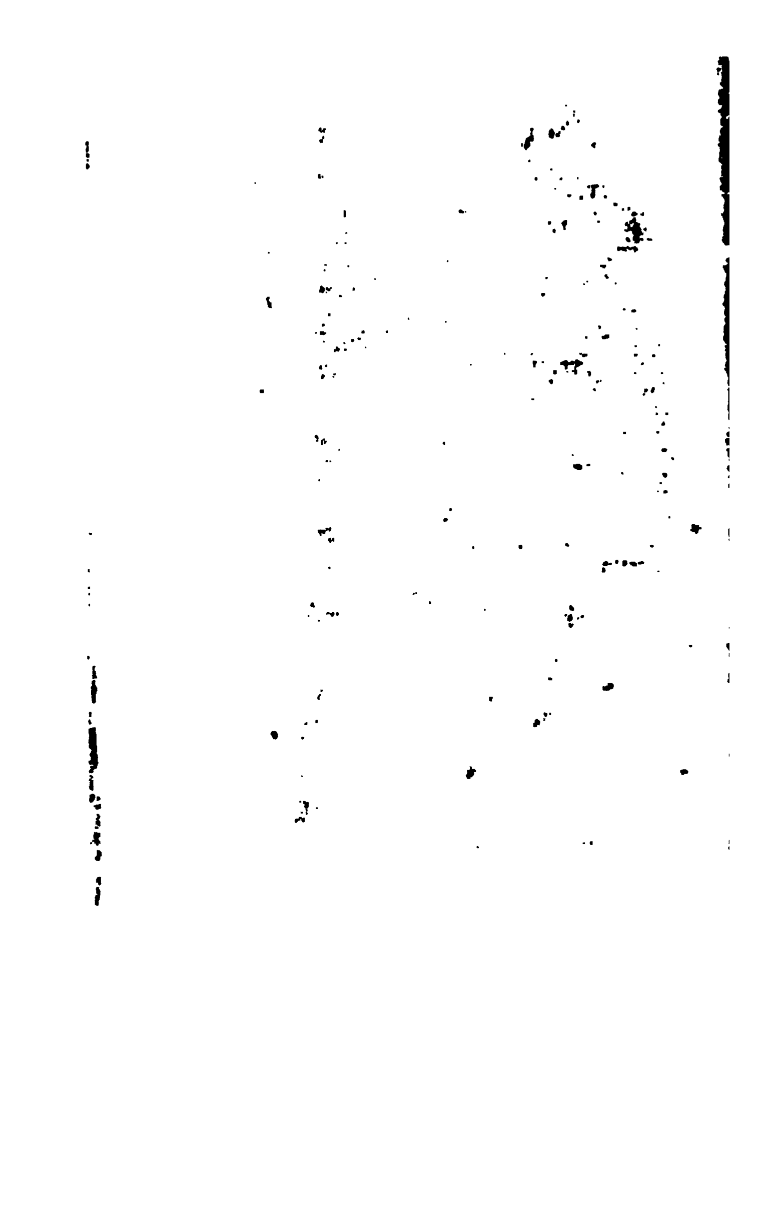
DU PREMIER VOLUME.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES

DU TOME PREMIER.

BAR-SUR-SEINE. — IMP. SAILLARD


Fig. 44.
Fig. 45.
Fig. 47.
Fig. 49.
Fig. 50.
Fig. 54.
Fig. 55.



IOMBODODECAÈDRE.

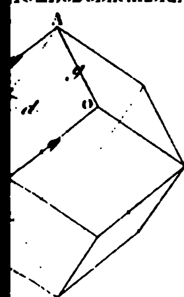


Fig. 5.

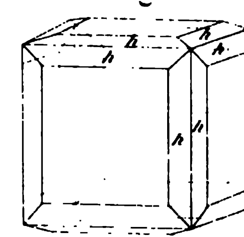


Fig. 9.

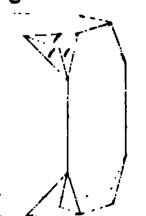
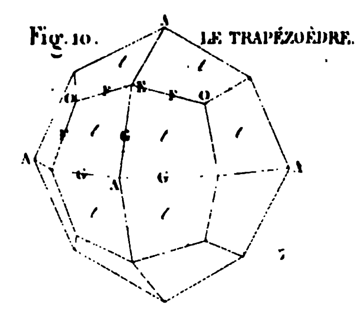


Fig. 10. LE TRAPÉZOÈDRE.



LE SCALÉNOÈDRE.

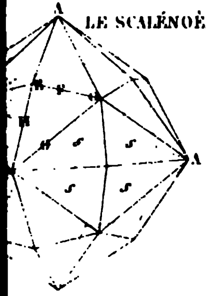


Fig. 15.

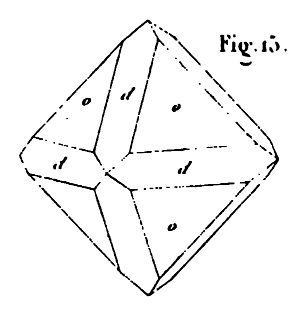
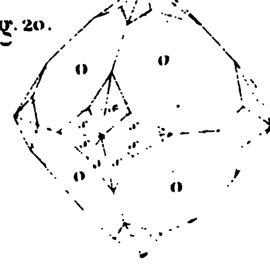
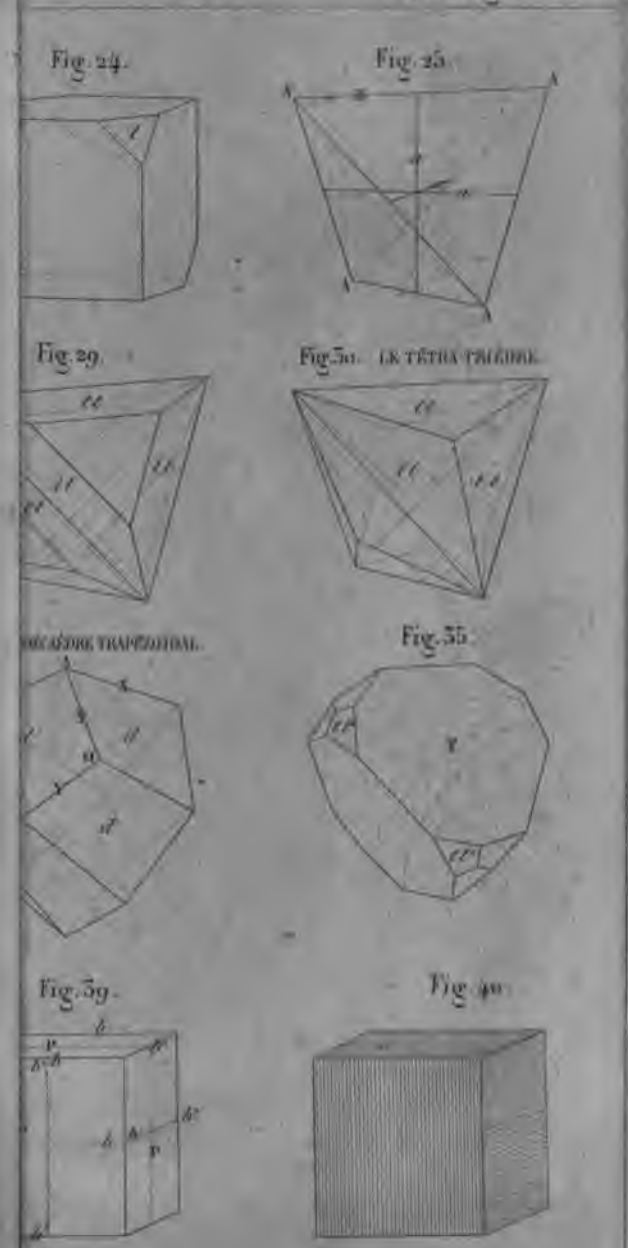


Fig. 20.




Fig. 24.
Fig. 25.
Fig. 29.
Fig. 30. LE TÉTRA TRIÈDRE.
Fig. 35.
Fig. 39.
Fig. 40.


LE DODÉCA-DIÈDRE

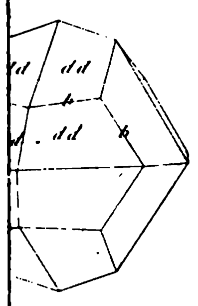


Fig. 45.

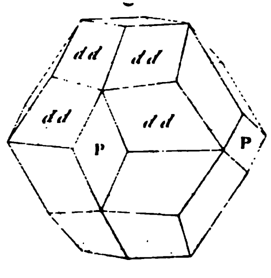


Fig. 49.

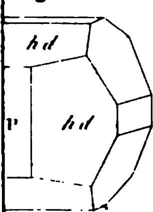


Fig. 50.

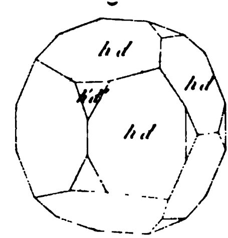


Fig. 54.

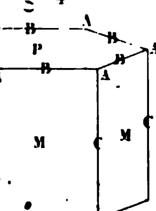


Fig. 55.

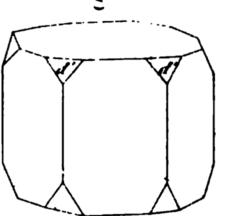


Fig. 59.

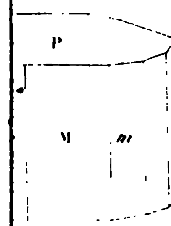
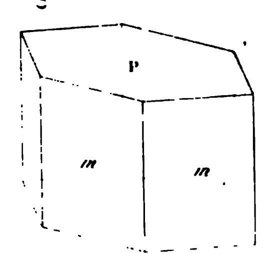


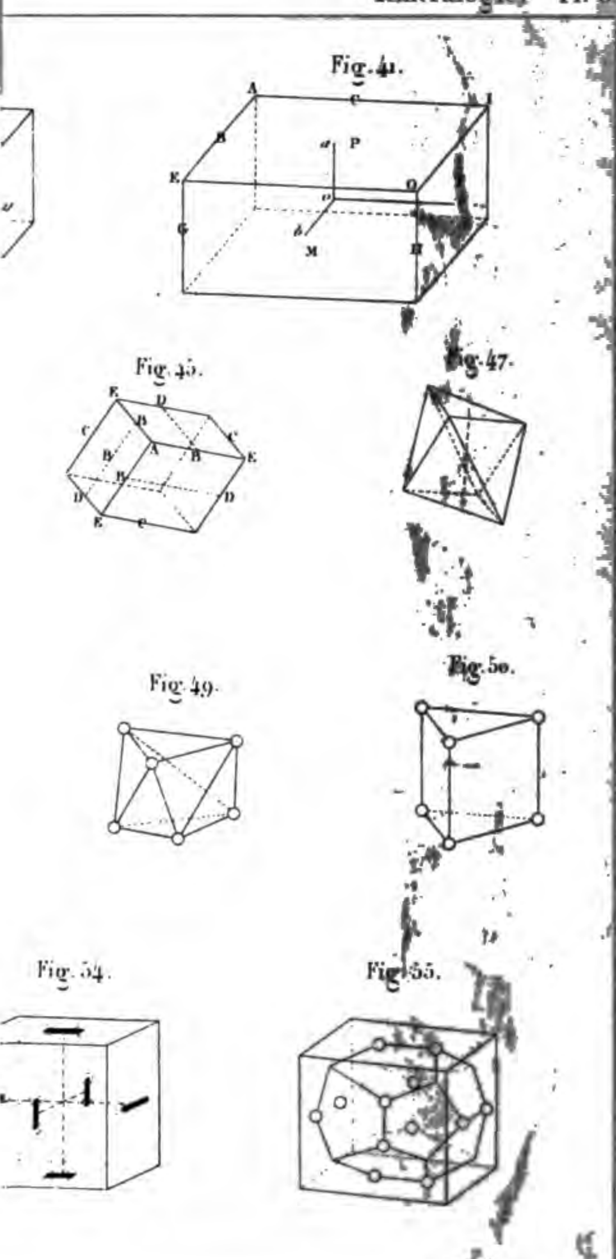
Fig. 60. LE PRISME ALTERNE.



FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES

DU TOME PREMIER.

BAR-SUR-SEINE. — IMP. SAILLARD.


Fig. 41.
A
C
I
B
a
P
E
O
o
G
b
M
H
Fig. 45.
E
D
C
B
A
B
C
E
B
B
D
D
E
C
Fig. 47.
Fig. 49.
Fig. 50.
Fig. 54.
Fig. 55.



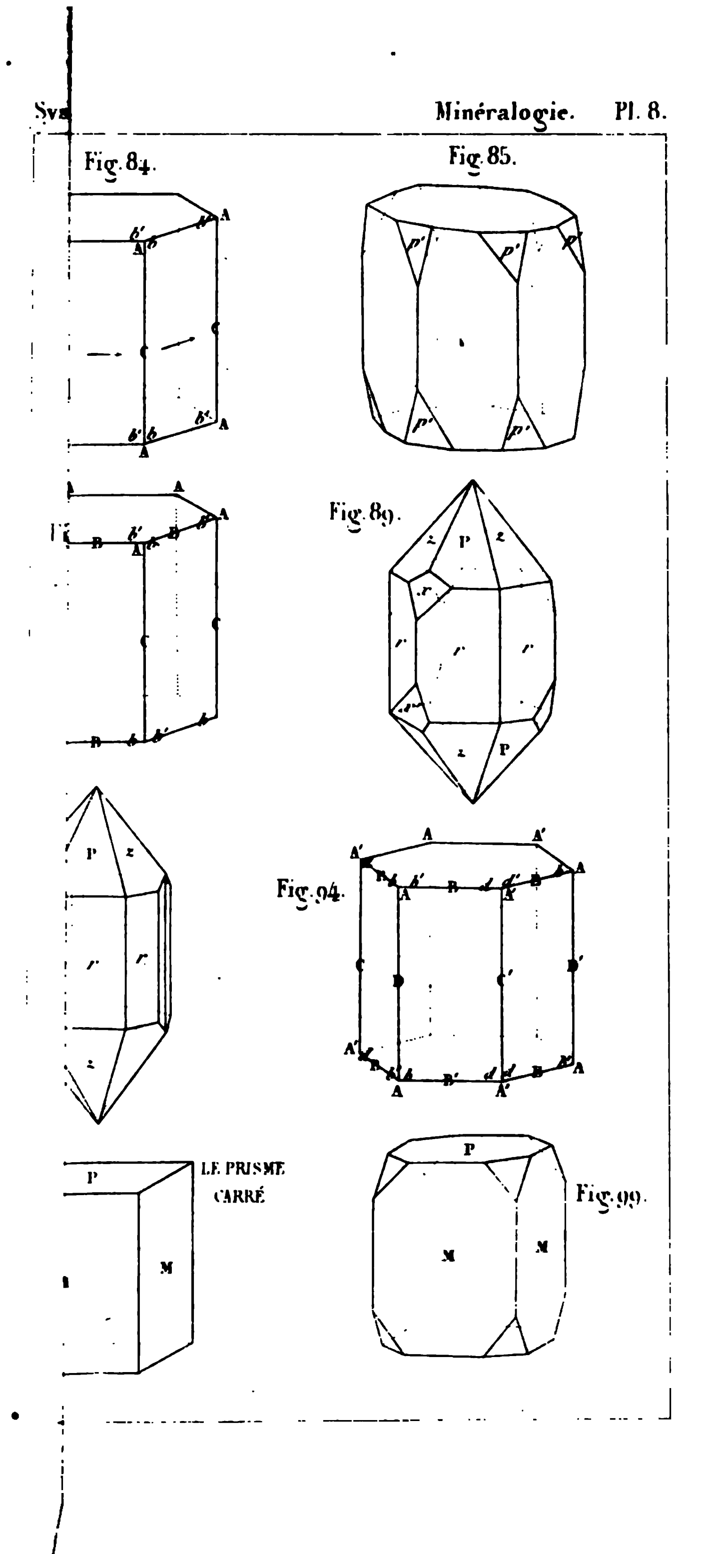
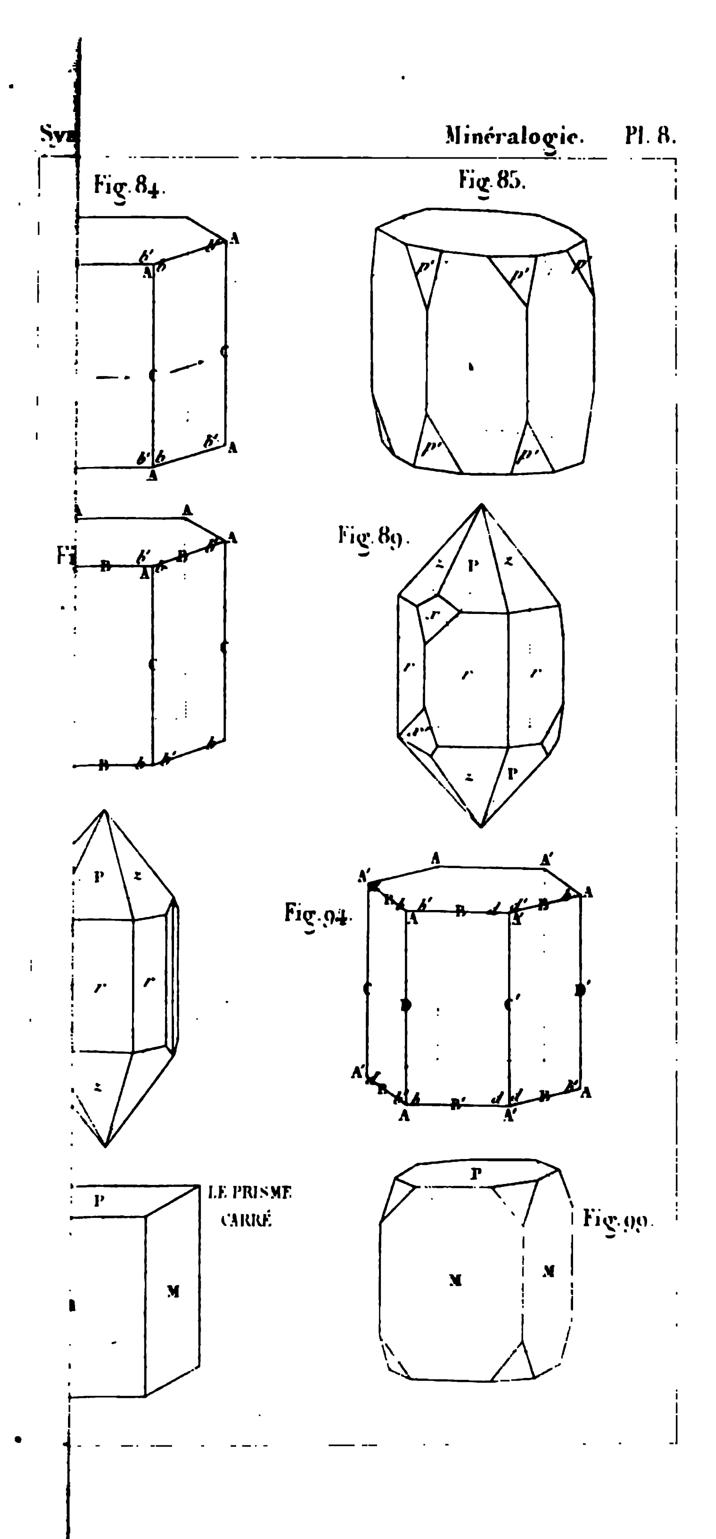
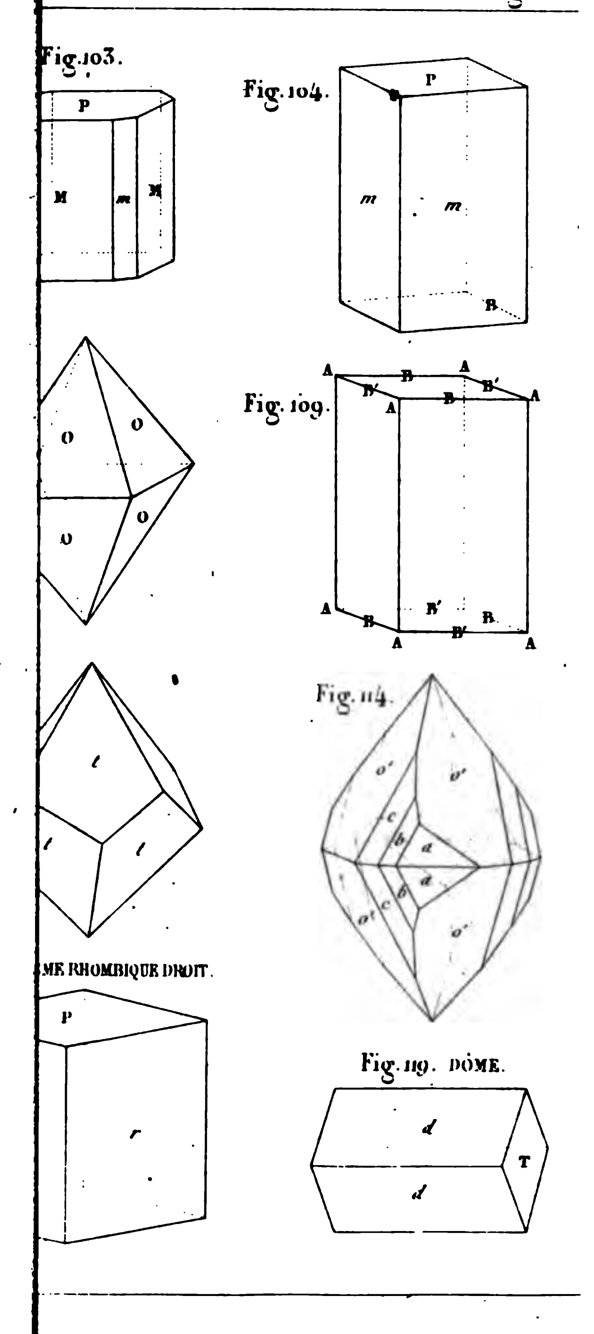


Fig. 84.
Fig. 85.
Fig. 89.
Fig. 94.
LE PRISME CARRÉ
Fig. 99.


Fig. 84.
Fig. 85.
Fig. 89.
Fig. 94.
LE PRISME CARRÉ
Fig. 90.


Fig. 103.
P
M
m
M
Fig. 104.
P
m
m
B
O
O
O
O
A
B
A
B'
A
Fig. 109.
B'
A
B
A
B'
B
A
B
A
B'
A
l
l
l
Fig. 114.
o'
o'
c
b
a
a
b
c
o'
o'
ME RHOMBIQUE DROIT.
P
r
Fig. 119. DÔME.
d
T
d



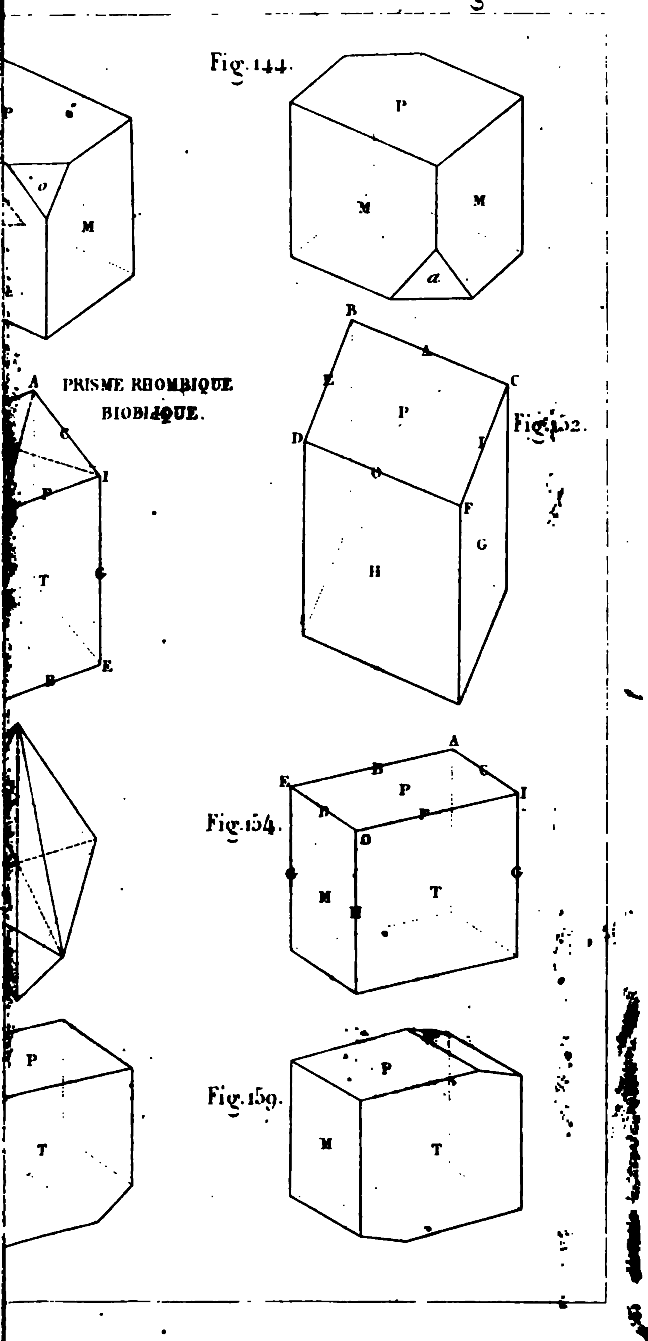

Fig. 144.
P
M
M
a
o
PRISME RHOMBIQUE
BIOBLIQUE.
Fig. 152.
H
G
Fig. 154.
T
Fig. 159.
T

Fig. 1.

Fig. 7.

Fig. 8.

Fig. 10.

Fig. 12.

Fig. 1

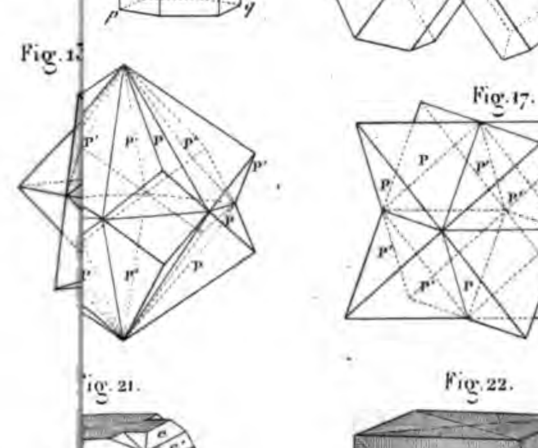


Fig. 17.

Fig. 21.

Fig. 22.

Fig. 23.

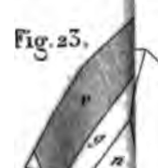


Fig. 28.

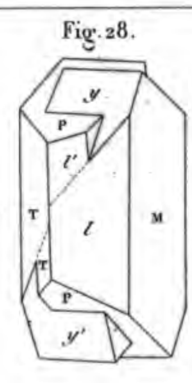


Fig. 29.

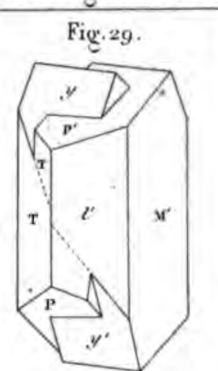
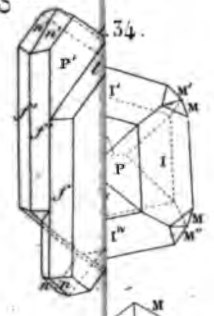


Fig. 30.



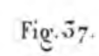


Fig. 37.

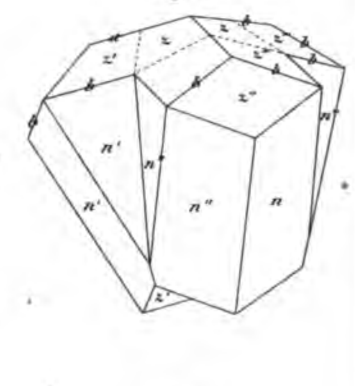


Fig. 41.

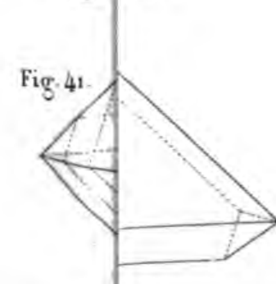
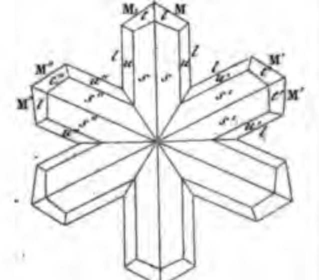
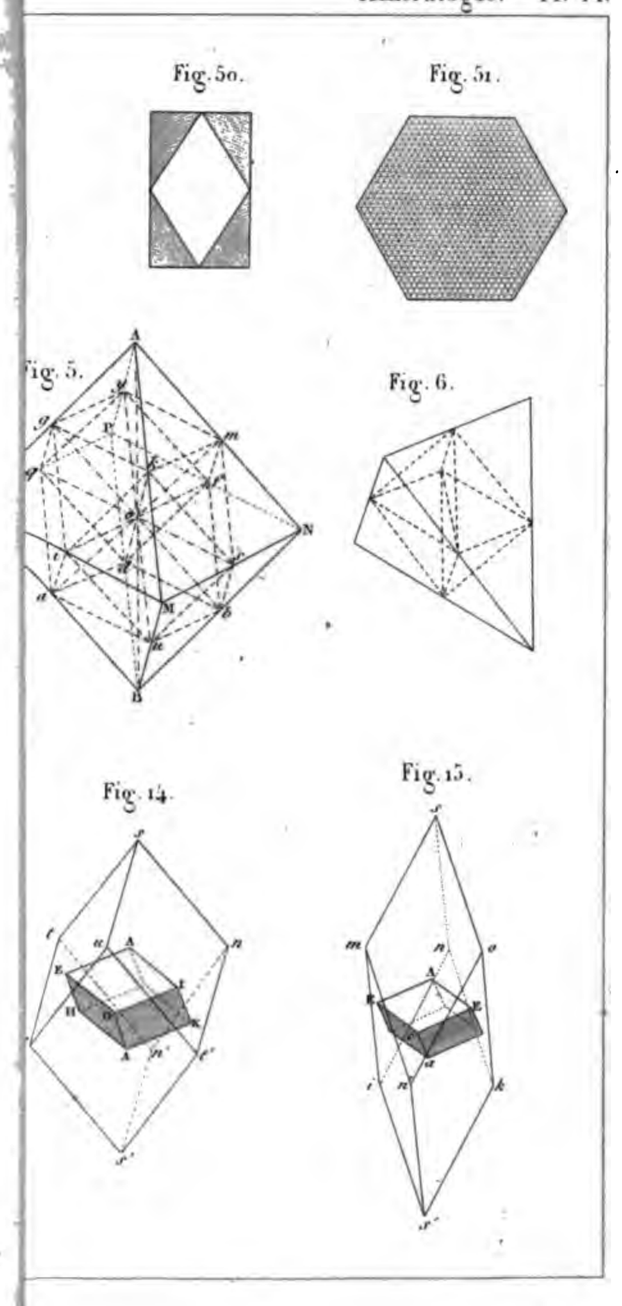
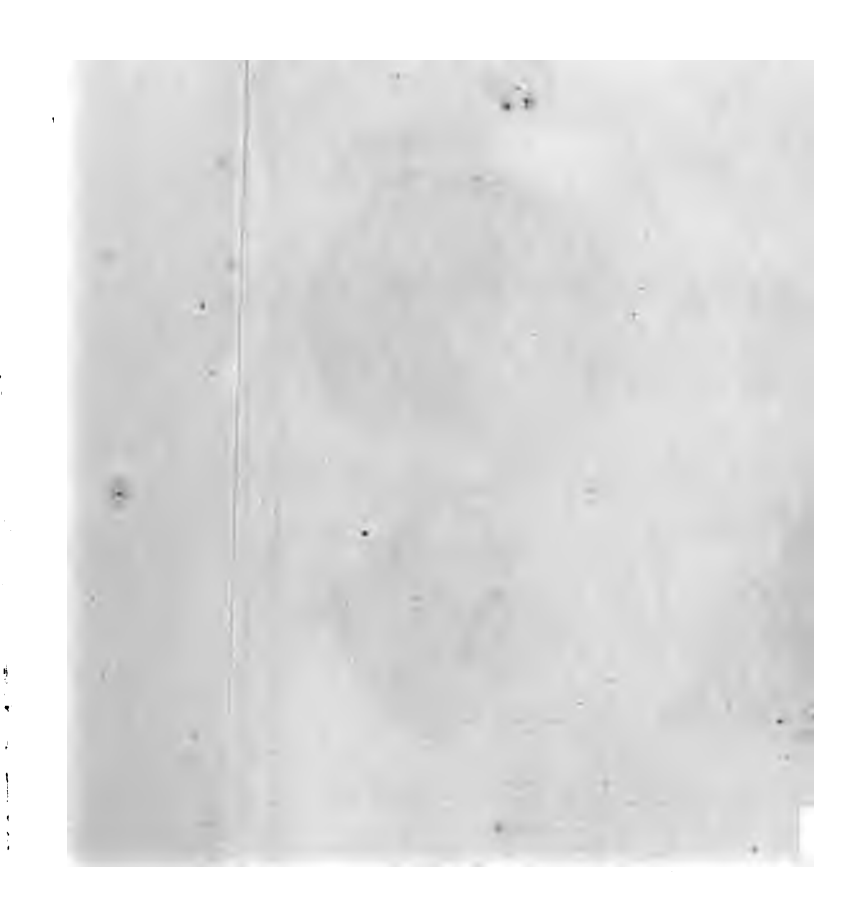
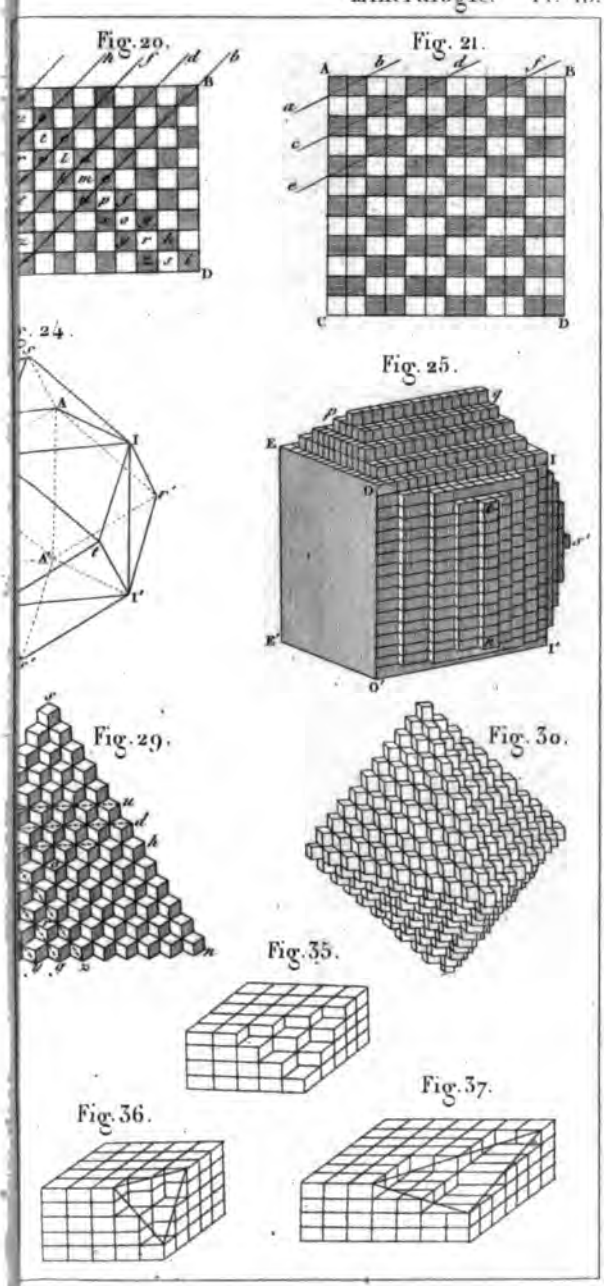


Fig. 40.

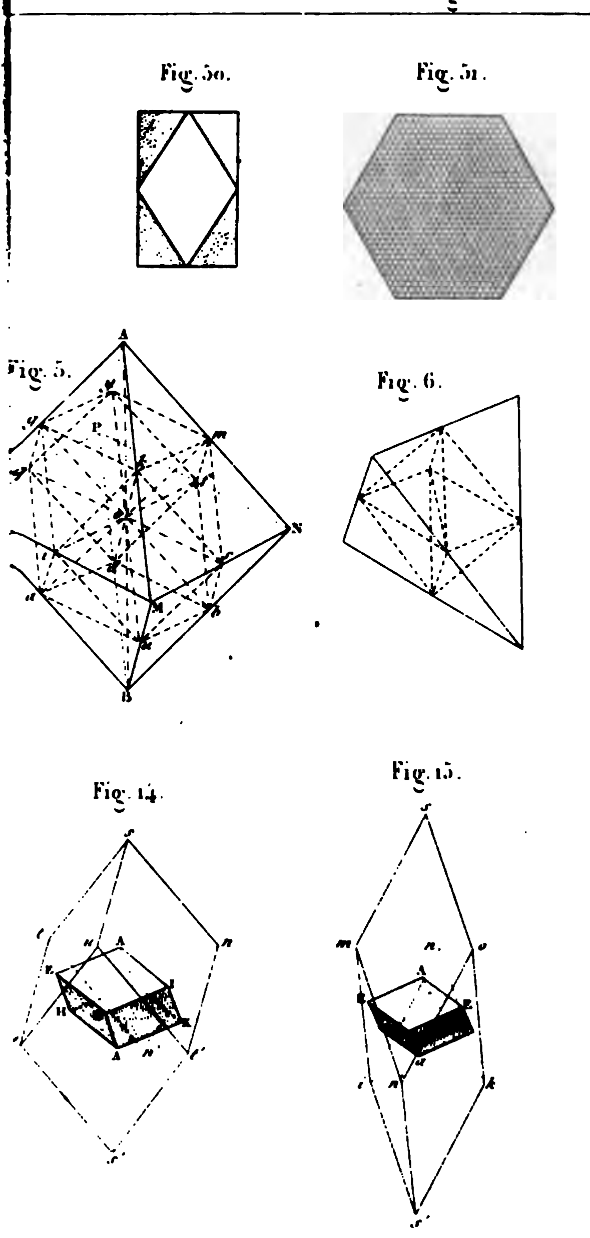



Fig. 50.
Fig. 51.
Fig. 5.
Fig. 6.
Fig. 14.
Fig. 15.




Fig. 20.
Fig. 21.
Fig. 24.
Fig. 25.
Fig. 29.
Fig. 30.
Fig. 35.
Fig. 36.
Fig. 37.




Fig. 50.
Fig. 51.
Fig. 5.
Fig. 6.
Fig. 14.
Fig. 15.



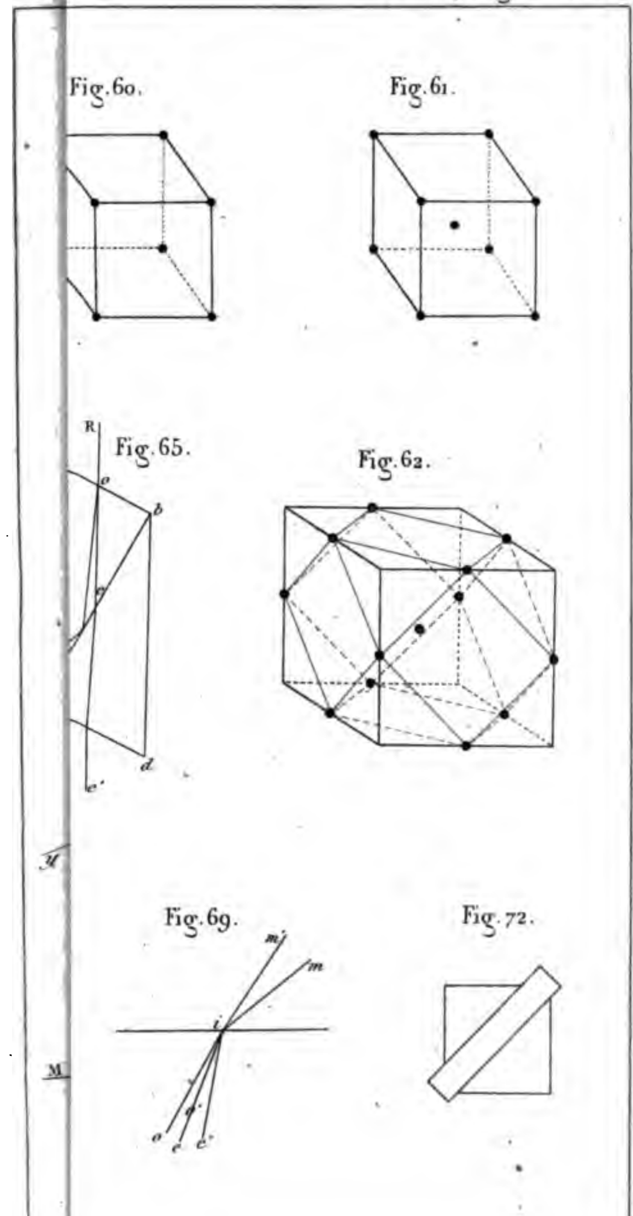

Fig. 60.
Fig. 61.
Fig. 65.
R
o
b
e
d
e'
Fig. 62.
Fig. 69.
m'
m
i
o
e
e'
Fig. 72.
M

Fig. 60.

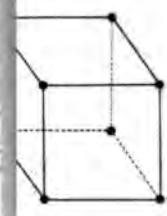


Fig. 61.

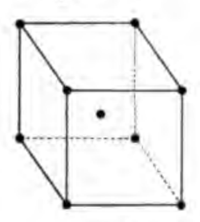


Fig. 65.



Fig. 62.

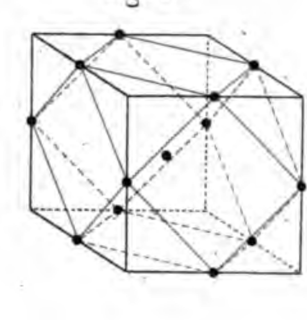


Fig. 69.

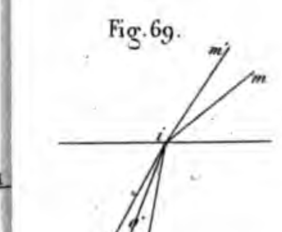
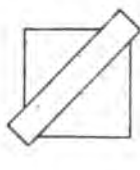
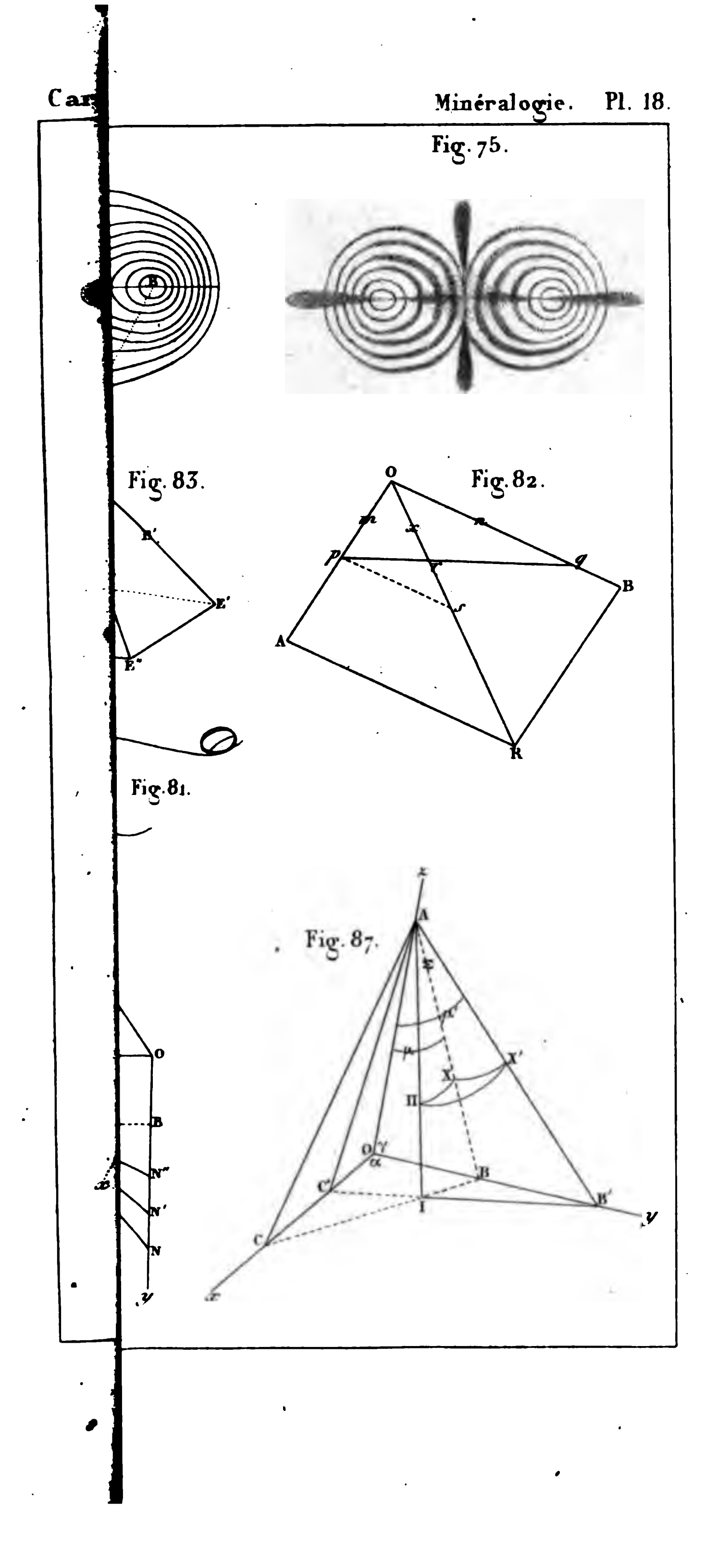
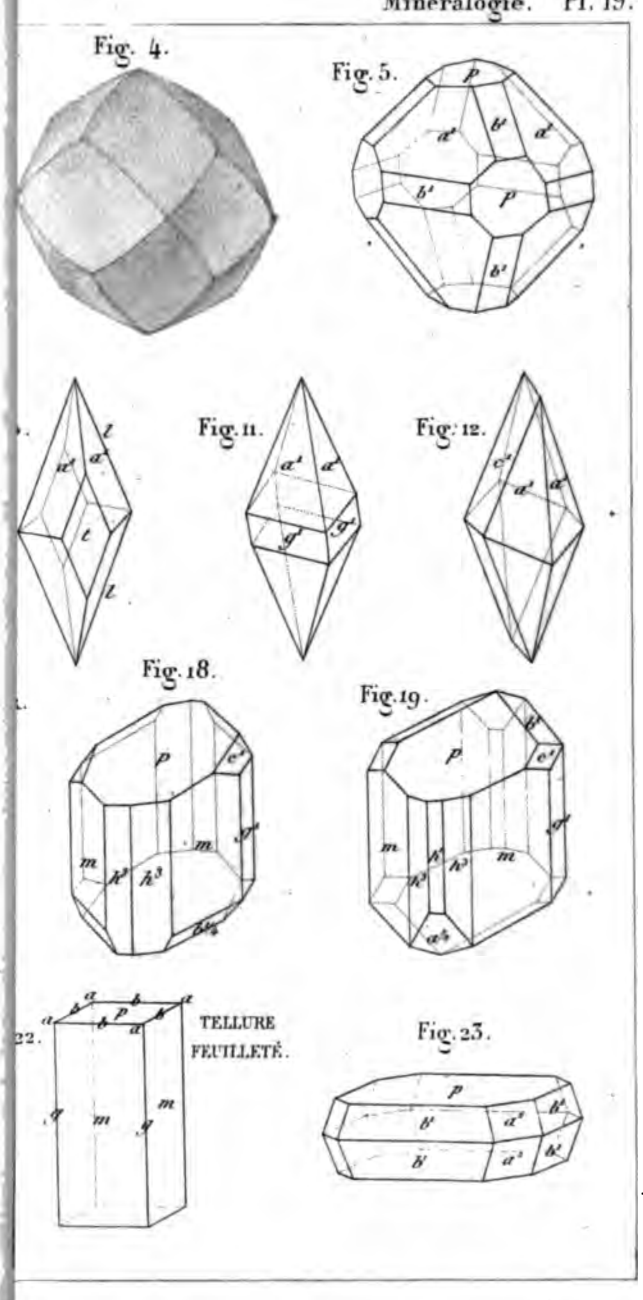


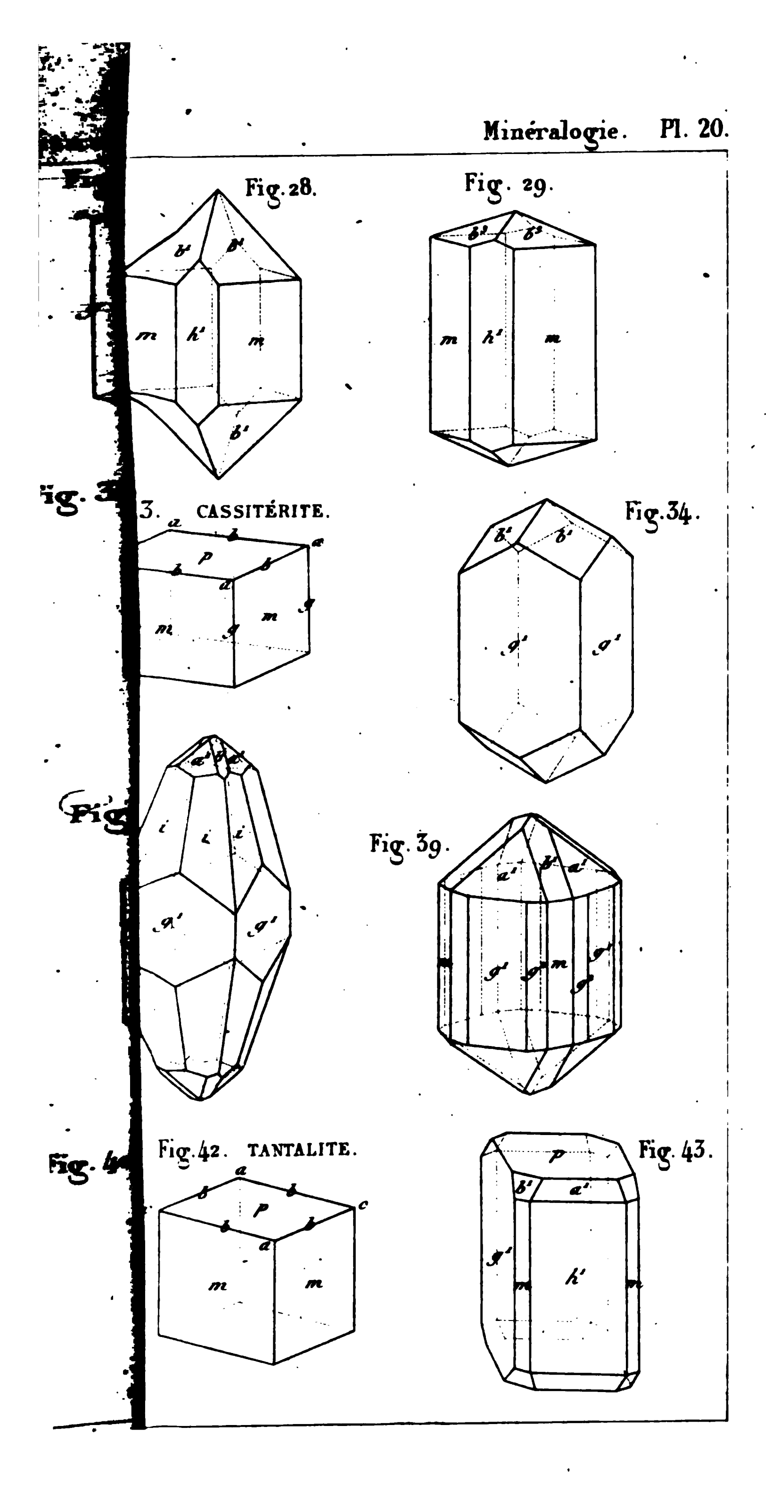
Fig. 72.






Minéralogie. Pl. 18.
Fig. 75.
Fig. 83.
Fig. 82.
Fig. 81.
Fig. 87.
O
A
B
R
p
q
m
n
x
y
s
E'
E"
N"
N'
N
X
X'
H
I
C
C'
B'
z


Fig. 4.
Fig. 5.
Fig. 11.
Fig. 12.
Fig. 18.
Fig. 19.
22.
TELLURE
FEUILLETÉ.
Fig. 23.


Fig. 28.
Fig. 29.
3. CASSITÉRITE.
Fig. 34.
Fig. 39.
Fig. 42. TANTALITE.
Fig. 43.



